

N° D'ORDRE :
261

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR JEAN PARISOT

Ingénieur-Chimiste I. C. N.

- 1^{re} THÈSE. — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'ARC ÉLECTRIQUE
INTENSIF ENTRE ÉLECTRODES DE CHARBON.
- 2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 6 avril 1949 devant la Commission d'examen.

MM. E. DARMOIS, *Président.*
RIBAUD, } *Examineurs.*
CHAUDRON, }

PARIS

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-ÉDITEUR

LIBRAIRE DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE
55, Quai des Grands-Augustins, 55

1950

N° D'ORDRE :
261

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR JEAN PARISOT

Ingénieur-Chimiste I. C. N.

1^{re} THÈSE. — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'ARC ÉLECTRIQUE
INTENSIF ENTRE ÉLECTRODES DE CHARBON.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 6 avril 1949 devant la Commission d'examen.

MM. E. DARMOIS, *Président.*
RIBAUD, } *Examineurs.*
CHAUDRON, }

PARIS

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-ÉDITEUR

LIBRAIRE DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE
55, Quai des Grands-Augustins, 55

1950

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen..... A. CHATELET.

PROFESSEURS

L. BLARINGHEM....	T	Botanique.	TEISSIER.....	T	Zoologie.
G. JULIA.....	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	MANGENOT.....	T	Biologie végétale.
A. DENJOY.....	T	Théorie des Fonctions et Topologie.	P. AUGER.....	T	Physique quantique et relativité.
L. LUTAUD.....	T	Géographie physique et géologie dynamique.	MONNIER.....		Physiologie générale.
E. DARMOIS.....	T	Enseignement de Physique.	PIVETEAU.....	T	Géologie.
ROBERT LÉVY.....	T	Physiologie comparée.	ROCARD.....	T	Physique.
HENRI VILLAT.....	T	Mécanique des fluides et applications.	H. CARTAN.....		Calcul différentiel.
CH. JACOB.....	T	Géologie.	SCHAEFFER.....	T	Physiologie des fonctions.
P. PASCAL.....	T	Chimie générale.	LAFFITTE.....		Chimie (P. C. B.).
M. FRÉCHET.....	T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.	FAVARD.....		Calcul des probabilités et Physique mathématique.
M ^{me} RAMART-LUCAS	T	Chimie organique.	COULOMB.....	T	Physique du globe.
FOCH.....	T	Mécanique physique et expérimentale.	M ^{lle} COUSIN.....	T	Biologie animale (P. C. B.).
PAUTHENIER.....	T	Electrotechnique générale.	CHRÉTIEN.....		Chimie (P. C. B.).
DE BROGLIE.....	T	Théories physiques.	DRACH.....		Zoologie.
JOB.....	T	Chimie générale.	KASTLER.....		Physique.
PRENANT.....	T	Anatomie et Histologie comparées.	CHATELET.....	T	Arithmétique et théorie des nombres.
COMBES.....	T	Physiologie végétale.	EPHRUSSI.....	T	Génétique.
GARNIER.....	T	Géométrie supérieure.	WURMSER.....	T	Biologie physico-chimique.
PÈRES.....	T	Mécanique rationnelle.	BAUER.....	T	Chimie-Physique.
HACKSPILL.....	T	Chimie minérale.	RIVIÈRE.....		Géologie (P. C. B.).
LAUGIER.....	T	Physiologie générale.	GAUTHERET.....		Biologie végétale (P. C. B.).
TOUSSAINT.....	T	Technique aéronautique.	LUCAS.....		Physique.
M. CURIE.....	T	Physique (P. C. B.).	MAX MORAND.....		Physique.
G. RIBAUD.....	T	Hautes températures.	ARNULF.....		Optique appliquée.
CHAZY.....	T	Mécanique analytique et Mécanique céleste.	A. THOMAS.....		Évolution des êtres organisés.
CROZE.....	T	Physique théorique et Physique céleste.	SOLEILLET.....		Physique.
DUPONT.....	T	Théories chimiques.	FORTIER.....		Mécanique expérimentale des fluides.
VALIRON.....	T	Calcul différentiel et calcul intégral.	DANJON.....	T	Astronomie.
BARRABÉ.....	T	Géologie structurale et Géologie appliquée.	FROMAGEOT.....		Chimie biologique.
VAVON.....	T	Analyse et mesures chimiques.	LAPORTE.....		Physique générale et Radio-activité.
G. DARMOIS.....	T	Mathématiques générales.	JANET.....		Mathématiques générales.
JACQUES BOURCART.		Géographie physique et Géologie dynamique.	PETIT.....	T	Biologie maritime.
AUBEL.....	T	Chimie biologique.	QUENEY.....	T	Météorologie et dynamique atmosphérique.
M ^{me} JOLIOT-CURIE.	T	Physique générale et Radio-activité.	GALLIEN.....		Biologie animale (P. C. B.).
PLANTEFOL.....	T	Botanique.	EICHORN.....		Biologie végétale (P. C. B.).
CABANNES.....	T	Recherches physiques.	DE CUGNAC.....		Biologie végétale (P. C. B.).
GRASSÉ.....	T	Évolution des êtres organisés.	LAVAL.....		Physique (P. C. B.).
PRÉVOST.....	T	Chimie organique.	M ^{lle} CAUCHOIS.....		Chimie-Physique.
BOULIGAND.....	T	Application de l'analyse à la Géométrie.	THELLIER.....		Physique du Globe.
CHAUDRON.....	T	Chimie appliquée.	AUDUBERT.....		Électrochimie.
WYART.....	T	Minéralogie.	L'HÉRITIER.....		Génétique.
			GRIVET.....	T	Radioélectricité.
			PONCIN.....		Mécanique des Fluides.
			THIRY.....	T	Mécanique appliquée.
			DUBREIL.....		Mathématiques générales.
			QUELET.....		Chimie (P. C. B.).

Secrétaire..... CH. MONIER



A

MONSIEUR OSWALD

**En témoignage de reconnaissance
et de respectueux attachement**

PREMIÈRE THÈSE.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'ARC ÉLECTRIQUE INTENSIF ENTRE ÉLECTRODES DE CHARBON.

INTRODUCTION.

L'arc électrique entre électrodes de carbone constitue une source de lumière dont les principales caractéristiques sont la haute brillance, la grande puissance possible et la richesse de son spectre, très voisin de celui de la lumière solaire.

Les électrodes couramment utilisées donnent des brillances qui s'étagent, suivant le type et l'intensité électrique, entre 12 000 et 120 000 sb; leur surface d'émission peut atteindre plusieurs centimètres carrés et la puissance mise en œuvre s'élève dans certains cas à 100 kW.

Depuis que l'arc électrique entre charbons a été abandonné pour l'éclairage urbain, c'est surtout sa haute brillance qui fait apprécier cette source.

Le seul générateur de lumière dont la brillance soit du même ordre de grandeur est la lampe à vapeur de mercure à haute pression. Philips a réalisé une lampe de ce type qui a une brillance maximum de 57 000 sb [1].

COTTON [85] signale des brillances de 122 000 et 180 000 sb obtenues avec des lampes expérimentales.

Un rapport des Commissions alliées mentionne un projecteur allemand de 5 kW, comportant une lampe à vapeur de mercure dont la brillance atteint 72 000 sb. Il ne semble cependant pas que ces réalisations réunissent toutes les qualités requises pour concurrencer sérieusement l'arc entre électrodes de carbone. Celui-ci, qui se prête particulièrement à la projection de la lumière, reste la source à peu près exclusivement utilisée dans les projecteurs cinématographiques, militaires ou marins.

Un gros progrès a été fait il y a une trentaine d'années à la suite de la découverte de l'Allemand BECK. En minéralisant fortement l'anode avec des sels de terres rares, on put accroître la densité de courant en maintenant un régime électrique stable. La brillance, alors limitée aux environs de 15 000 sb, put être portée à des valeurs de 50 000 à 120 000 sb. C'est cette forme particulière de l'arc, dit arc intensif, qui fait l'objet de mon étude.

Les recherches que j'ai effectuées dans les laboratoires de la Compagnie Lorraine de Charbons pour l'électricité, puis de la Société Le Carbone-Lorraine avaient pour objet le perfectionnement des charbons intensifs. Leur sens général était d'obtenir une brillance de plus en plus élevée, une lumière stable de composition spectrale adaptée aux différentes applications, au prix d'une consommation d'énergie et de matières aussi réduite que possible.

Au cours de mes recherches, j'ai été amené à établir des lois régissant l'influence de différents facteurs, dont la connaissance constitue des faits nouveaux. En particulier, les hautes brillances n'avaient été obtenues en régime stable qu'avec des anodes minéralisées avec des sels de terres rares. Or, j'ai pu obtenir, avec des électrodes de compositions originales exemptes de terres rares, un effet BECK spontané et stable. Je rapporterai au cours de mon exposé d'autres perfectionnements plus ou moins importants que j'ai réalisés, dans la mesure où ils concourent à l'explication du mécanisme de l'arc intensif.

Les appareils originaux mis au point sous mon impulsion pour l'étude de l'arc seront décrits. Parmi les recherches, certaines me sont personnelles, d'autres ont été faites en commun avec mes collaborateurs.

Je citerai d'autre part les résultats obtenus dans mon laboratoire par certains de mes collaborateurs ou en équipe, lorsqu'ils seront utiles à l'explication des phénomènes étudiés, au même titre que je mentionnerai les documents publiés par d'autres.

La bibliographie de langue française étant ancienne et insuffisante, je crois utile, avant d'entrer dans le vif du sujet, de rappeler non seulement l'essentiel de ce qui est connu de l'arc intensif, mais aussi de l'arc classique entre charbons. La connaissance de ce dernier est en effet une base indispensable à l'étude de l'arc intensif. Ce rappel me permettra de classer les différents types d'arcs et de bien situer la question sur laquelle la littérature existante est en effet souvent confuse.

DÉFINITION DE L'ARC ÉLECTRIQUE.

L'arc est une forme de la décharge électrique dans les gaz dont les principaux caractères sont les suivants :

- Différence de potentiel faible, se chiffrant par quelques dizaines de volts (20 à 100 V), alors que l'intensité électrique peut se compter par centaines de milliers d'ampères.
- Densité de courant cathodique élevée pouvant atteindre des milliers d'ampères par centimètre carré.
- Chute cathodique souvent inférieure à la chute cathodique normale.
- Cathode portée localement à haute température et émettant abondamment des

électrons par un processus thermionique, au moins pour sa plus grande part. Bien que ce dernier point ait été admis par la plupart des auteurs, dont J. J. THOMSON [2], HAGENBACH [3], BLONDEL [5], pour ne citer que les principaux, il a été mis en doute dans quelques cas particuliers (arc STOLT) [6], arc GARBARINI [7]. Quoi qu'il en soit, les arcs dont nous nous occuperons présentent au plus haut degré le dernier caractère. En outre, les matières constituant les électrodes participent *fortement*, sinon exclusivement, à l'alimentation de l'arc.

Je limiterai mon étude aux arcs éclatant dans l'air, à la pression atmosphérique, entre deux électrodes de carbone. Ne prenant l'arc classique qu'à titre de comparaison, j'étudierai l'arc entre électrodes de carbone fortement chargées de corps minéraux, et supportant une densité de courant supérieure à 0,3 A : mm² de section.

TECHNIQUE DE FABRICATION DES ÉLECTRODES DE CARBONE.

Afin de faciliter la compréhension de mon exposé, je crois bon de décrire dans ses grandes lignes le procédé de fabrication des charbons d'arc, et de définir quelques termes de métier.

Les matières de base sont des variétés de carbone techniquement pures. La principale est le *noir de fumée*, obtenu par combustion incomplète de naphthaline, d'anthracène, et d'huiles de goudron. On emploie également du coke de brai, du coke de pétrole, du graphite artificiel ACHESON, des graphites naturels purifiés. L'agglomérant habituel est du goudron, généralement reconstitué à partir du brai de houille et d'huile de houille.

Les matières convenablement pulvérisées et mélangées sont liées avec le goudron dans des appareils mélangeurs et malaxeurs chauffés. La pâte ferme ainsi obtenue est meulée et calandree, mise en cartouche, et enfin filée à chaud à la presse hydraulique sous des pressions de l'ordre de 1 t : cm². On obtient ainsi des bâtons de pâte, généralement de section cylindrique, dont on fait des paquets qu'on cuit lentement dans des creusets de terre réfractaire sous protection de poudre de charbon. Ainsi qu'en céramique, on est souvent obligé d'incorporer dans le mélange une certaine proportion de matière déjà cuite, afin de diminuer le retrait à la cuisson et la fissuration qui en découle; c'est notamment le cas lorsque la matière de base est le *noir de fumée*.

Au cours de la cuisson, les huiles de goudron et une partie du brai s'évaporent. Les composants les plus lourds du brai subissent une décomposition thermique et abandonnent du coke qui établit une liaison entre les grains de carbone.

La matière agglomérée obtenue est donc entièrement constituée par du carbone technique. La température de cuisson est poussée jusqu'à 1250°, afin de conférer à l'ensemble une conductibilité suffisante. Les bâtons ainsi obtenus sont couramment appelés charbons d'arc.

Les charbons d'arc ont des résistivités de l'ordre de 6 000 $\mu\Omega \times \text{cm}$ lorsqu'ils sont à base de noir de fumée, 4 500 lorsqu'ils sont riches en coke, 600 à 900 seulement lorsqu'ils sont préparés à partir du graphite naturel. La présence d'impuretés minérales peut causer de graves perturbations, aussi les matières premières doivent-elles en contenir le moins possible. Le *noir de fumée*, en particulier, obtenu en phase gazeuse, ne laisse après combustion que 0,05 % de cendres fixes.

DÉFINITION DES TERMES TECHNIQUES.

Charbon homogène. — Électrode pleine de composition homogène.

Charbon à mèche. — Électrode avec canal longitudinal au voisinage de l'axe, appelé trou de mèche, dans lequel on a introduit un mélange de charbon et de matière minérale.

Écorce. — Corps du charbon à mèche.

Mèche molle. — Ensemble des matières introduites dans le trou de mèche sous forme de pâte durcie ensuite par cuisson.

Mèche dure. — Ensemble des matières introduites par le trou de mèche sous forme d'un aggloméré filé et cuit préalablement à son scellement dans l'écorce.

Charbon non minéralisé. — Charbon dont la mèche ne renferme que de petites quantités de corps minéraux ne colorant pas l'arc.

Charbon minéralisé. — Charbon dont la mèche renferme une proportion notable, en général au moins 30 % de corps minéraux colorant l'arc.

Charbon cuivré. — Charbon sur lequel on a déposé du cuivre par électrolyse pour rendre l'ensemble plus conducteur.

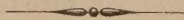
Charbon positif ou négatif. — Charbon servant respectivement d'anode ou de cathode.

Arc électrique. — Au sens propre, plasma entre les électrodes entre lesquelles passe le courant. On emploie quelquefois improprement les termes flamme positive ou flamme négative, au lieu de partie anodique ou partie cathodique de l'arc, lorsque l'arc semble séparé en deux parties bien distinctes.

Flamme de l'arc. — Gaz incandescents surplombant l'arc.

Longueur d'arc. — Distance la plus courte entre les extrémités des électrodes.

Tension d'arc. — Tension mesurée entre les pièces amenant le courant électrique aux charbons. Elle se compose de la chute de tension dans l'arc proprement dite, augmentée des chutes de tension dans les électrodes et au contact de ces dernières avec les pièces d'amenée du courant.



CHAPITRE I.

DESCRIPTION DES ARCS EMPLOYÉS PAR LA TECHNIQUE.

I. — ARC CLASSIQUE ENTRE CHARBONS.

Je rappelle brièvement les caractères de cet arc en courant continu. Lorsqu'on rompt un circuit électrique par l'écartement de deux électrodes en charbon, l'arc jaillit entre ces dernières. Si les caractéristiques du circuit sont convenables, il est possible d'écarter les charbons de plusieurs millimètres à plusieurs centimètres, suivant l'intensité mise en jeu, sans que le courant cesse de passer. Les extrémités des deux charbons sont portées à haute température, et, une fois le régime établi, prennent une forme immuable : la cathode se taille en pointe, l'anode ne s'amincit que légèrement et son extrémité, comme tranchée suivant un plan perpendiculaire à l'axe, se creuse en forme de cratère.

La température maximum du cratère anodique a fait l'objet de nombreuses recherches. VIOLLE trouva autrefois 3780° K. La température de brillance est connue avec précision : 3820° K ± 10 d'après CHANEY [8], 3825° K d'après MONNIG et LUCAS [9] pour ne citer que des travaux récents. La distribution du rayonnement du cratère est comparable à celle du corps noir porté à 3700° K d'après FINKELNBURG [10], 3925° K d'après CHANEY [87], la température de couleur est 3780° K d'après PRIEST ⁽¹⁾. C'est sur la température de brillance que les chiffres publiés s'accordent le mieux, mais la connaissance exacte du pouvoir émissif du carbone à ces hautes températures manque pour pouvoir calculer avec certitude la température vraie. FINKELNBURG estime cette dernière à 4040° K ⁽²⁾, PODZUS à 4200° K, WENSEL, partant du chiffre de CHANEY, 3925° K tiré du λ maximum, la situe entre 3860° K et 3925° K.

On admet généralement que la température du cratère atteint une valeur limite en régime stable pour une pression donnée. De nombreux auteurs ont en conséquence proposé le cratère comme repère de haute température et de haute brillance. Je ne citerai à ce sujet que les travaux les plus récents de CHANEY [8] et de MAC GREGOR MORRIS [13]. La supposition que cette température limite est celle de la sublimation du carbone à la pression atmosphérique avait été contestée par FINKELNBURG, qui

⁽¹⁾ PRIEST, *J. Opt. Soc. Amer.*, 7, 1923 p. 78.

⁽²⁾ KOHN et GUECKEL, *Z. f. Phys.*, 27, 1926, p. 305.

donne cette dernière comme supérieure à 4040°K , mais les mesures de RIBAUD, faites sur des enceintes de graphite constituant un corps noir, permettent de conclure à 3764°K pour la température de sublimation du carbone sous la pression de 760 mm de mercure, voir [86], [89], [66.3], et en particulier [66.4].

La partie rayonnante de la cathode est beaucoup plus petite que le cratère anodique, et se trouve portée à plus basse température. C'est donc le cratère qui rayonne le plus

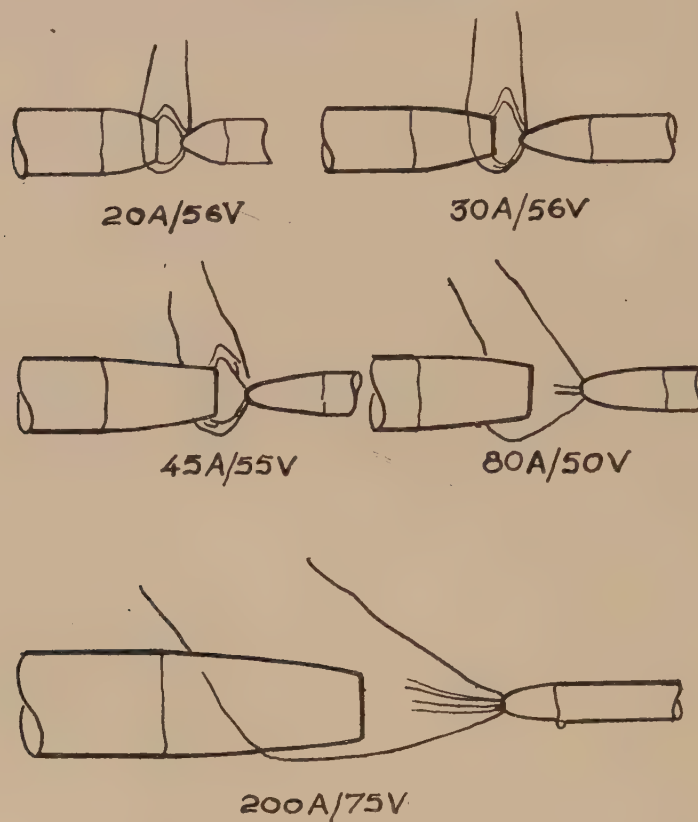


Fig. 1. — Aspects de l'arc non minéralisé.

de lumière. L'énergie dégagée y est plus considérable, car les chutes cathodiques et anodiques sont respectivement de l'ordre de 8 à 9 V et de 31 V d'après les travaux de M^{me} AYRTON [14].

MASON a donné des chiffres respectifs de 10 et 20 V pour des arcs de faibles puissances [15].

L'arc lui-même, bien qu'étant à une température bien plus élevée que les charbons, rayonne beaucoup moins de lumière. De nombreuses recherches ont été faites sur la température de l'arc. SURTS, par la vitesse de propagation du son, a trouvé 5500°K [64] et par l'étude de chutes de particules 7000°K [65].

ORNSTEIN, d'après l'intensité de bandes et de raies spectrales, a conclu à environ 6 000° K [61].

Par des méthodes analogues MANNKOPF a trouvé 6 à 7 000° K [63], LOCHTE, HOLTGREVEN et MAECKER 6 700 à 7 600° K [66].

ROHLOFF, enfin, partant d'une mesure directe de 3 800° K à la pointe de la flamme, et utilisant la vitesse de propagation d'une perturbation dans l'arc, a conclu à une température croissant de 3 800° K à la pointe de la flamme à 10 000° K aux environs immédiats du cratère [16]. Cette valeur semble trop élevée.

Au fur et à mesure que l'intensité augmente, la partie de l'arc voisine de la cathode se ramasse, tandis que la flamme surplombant la partie anodique si les charbons sont horizontaux, ou lèchant le charbon supérieur, si les charbons sont verticaux, prend plus d'importance. Vers 80 A, une petite langue émanant de la cathode apparaît. Cette langue se précise, grandit, s'entoure d'un espace sombre, et prend à partir d'une centaine d'ampères un aspect qu'elle conserve jusqu'au moins 650 A, intensité limite que j'ai eu l'occasion de mettre en œuvre. Quant à la partie anodique de l'arc, elle ne change pas sensiblement d'aspect en régime stable, la flamme s'incline seulement vers le charbon (fig. 1).



Fig. 2.

a. Arc trop court.

b. Charbon — surcharge.

J'ai dit qu'un charbon techniquement pur servant de cathode se taille en pointe. La forme de cette pointe dépend de l'écartement et de la densité de courant. Au fur et à mesure que cette dernière augmente, le charbon s'échauffe de plus en plus loin de l'arc et brûle (fig. 2 b); on n'a plus alors affaire à un régime stable, et le charbon est dit surchargé, sans que pour cela l'arc en soit forcément perturbé. L'intensité limite que peut supporter un charbon dépend, pour une section déterminée et des conditions d'ambiance identiques, de ses conductibilités électrique et thermique, qui conditionneront sa température, et de sa résistance à la combustion. L'artifice le plus souvent utilisé pour augmenter la capacité de charge d'un charbon cathodique est de le cuivrer extérieurement par électrolyse. Pour prendre un exemple, un certain charbon de Φ 6 mm peut supporter 50 A s'il est cuivré, alors qu'il en supporte à peine 25 sans cuivrage.

Les mêmes considérations s'appliquent à un charbon servant d'anode, mais, avant qu'on atteigne une intensité suffisante pour que le charbon rougisse et brûle, intervient le phénomène d'instabilité de l'arc. Un arc stable est caractérisé par un régime électrique déterminé et régulier, c'est-à-dire que pour une longueur d'arc et une tension aux bornes données, il n'existe qu'une valeur possible de l'intensité. Les conditions de stabilité d'un arc entre deux charbons donnés, alimentés par un circuit de caractéristiques déterminées, peuvent être exprimées en fonction de trois variables, dont deux seulement sont indépendantes : intensité, tension et longueur d'arc. Les deux plus commodes à utiliser sont l'intensité et la longueur d'arc, seules susceptibles d'une mesure exacte. La tension ne peut en effet être mesurée facilement qu'entre les pinces d'amenée de courant. Le chiffre obtenu totalise la tension réelle de l'arc, la chute de tension dans les

charbons, et les chutes de tension aux contacts. Pour une intensité donnée, la longueur d'arc devra être comprise entre deux limites. En dessous de la limite inférieure, l'arc bruisse et de la vapeur de carbone se condense sur la pointe de la cathode sous forme de graphite. On dit que l'arc « champignonne » (*fig. 2 a*); au-dessus, l'arc devient instable par suite de l'action du courant d'air ascendant, et ses points d'impact sur les électrodes se déplacent. Si les charbons sont de bonne qualité, et que la tension d'alimentation soit constante, les variations d'intensité ne doivent pas excéder 1 % de la valeur moyenne. L'arc est alors clair, fixe, silencieux, et la brillance de la surface du cratère ne subit dans le temps que des fluctuations de quelques unités pour cent.

Une augmentation brutale de l'intensité ayant une cause extérieure peut provoquer l'apparition d'un régime instable momentané, après lequel un nouveau régime stable s'établit. La surface du cratère est, pour un charbon donné, en relation directe avec l'intensité du courant. REY [78] a établi la formule empirique suivante, dans laquelle S exprime la surface du cratère en millimètres carrés, D le diamètre du charbon en millimètres, I l'intensité du courant en ampères

$$S = 0,093 DI.$$

En élevant l'intensité, on augmente la surface du cratère, tandis que la brillance reste à peu près inchangée, mais, à partir d'une certaine valeur de l'intensité, l'arc devient instable et bruyant, et la brillance élémentaire du cratère subit des variations très rapides dans l'espace et dans le temps [17]. La lumière rayonnée est alors inutilisable.

La densité de courant limite pour l'obtention d'un arc stable peut être largement augmentée par l'incorporation de sels minéraux dans la masse du charbon positif, ou mieux dans sa partie médiane. On ménage couramment un canal ayant généralement un diamètre égal au tiers ou au quart de celui du charbon, et l'on y introduit un mélange de charbon et de matières minérales agglomérés appelé mèche. Beaucoup de corps minéraux peuvent aussi stabiliser l'arc, mais on utilise généralement des corps dont le spectre d'arc est peu riche en radiations colorées, tels que l'acide silicique, l'acide borique, les silicates, borates et carbonates alcalins. Ces corps, plus volatils et plus facilement ionisables que le carbone, alimentent l'arc. Par exemple, un charbon de 12 mm ainsi méché peut supporter une intensité de 35 A contre 10 seulement pour un charbon homogène de même diamètre. La présence de corps minéraux permet également d'allonger l'arc en conservant une bonne stabilité, ce qui diminue l'occultation du cratère par la pointe cathodique. Enfin, ils empêchent le régime de devenir critique lorsqu'on rapproche brusquement les charbons pour en compenser l'usure.

Il est intéressant de signaler que les charbons couramment utilisés n'ont presque jamais une caractéristique tension/intensité descendante, comme ceux faisant l'objet du travail de M^{me} AYRTON, tout au moins dans leurs conditions pratiques d'utilisation.

La figure 3 reproduit les caractéristiques d'un appairage couramment utilisé.

LEBLANC [18] avait déjà signalé qu'un charbon positif à mèche donne une courbe passant par un minimum. En retranchant des tensions brutes relevées aux bornes de la lampe les chutes de tension parasites dans les contacts et dans les charbons, M. ANDRÉ a trouvé que l'allure remontante est due à l'accroissement des chutes parasites en fonction de l'intensité. Il ressort que la caractéristique inhérente à l'arc même est horizontale ou légèrement descendante.

Pour obtenir une bonne stabilité, il est recommandé d'intercaler en série avec l'arc une résistance telle que pour les tensions de 42 à 55 V utilisées aux intensités inférieures à 80 A, la différence de potentiel aux bornes de la dynamo soit au moins de 70 V. Les dynamos d'alimentation utilisées sont généralement du type shunt.

L'utilisation de l'arc dans les projecteurs a conduit à pousser à l'extrême les intensités de courant. L'Armée et la Marine française utilisaient encore en 1939 des projecteurs de 150 cm fonctionnant à 150 et 200 A avec des charbons positifs de Φ res-

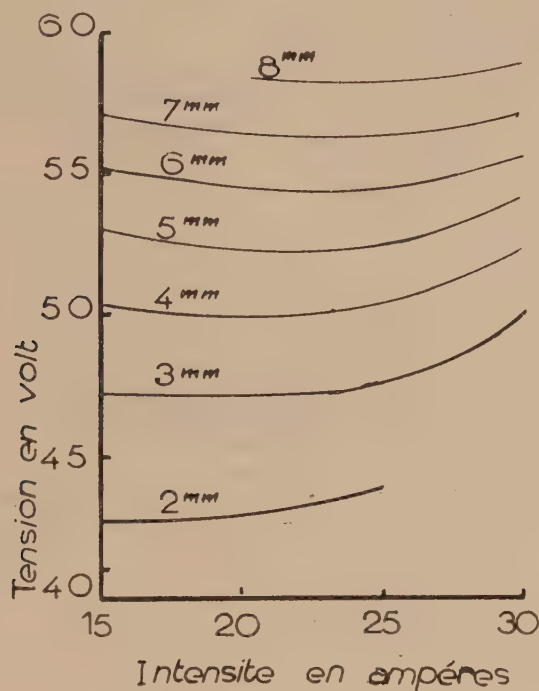


Fig. 3. — Caractéristique V/I à plusieurs longueurs d'arc.

Charbon + à mèche qualité 252 Φ 12 mm.

Charbon — homogène qualité 259 Φ 8 mm.

(Marque Cielor.)

pectifs de 36,5 mm et 38 mm; les phénomènes cathodiques apparaissant à partir de 80 A nécessitaient un allongement de l'arc et une augmentation de la tension aux bornes des lampes qui atteignait 75 V.

La brillance du cratère n'était pas augmentée, mais seulement sa surface. Avec réglage au foyer du miroir, on obtenait donc un élargissement du champ, mais pas une augmentation de la portée.

Pour que la brillance moyenne se rapprochât le plus possible de la brillance maximum, il était néanmoins intéressant de chercher à surcharger l'anode sans risquer de sortir accidentellement de la zone de régime stable. Certains constructeurs français avaient résolu le problème en faisant tourner le charbon positif sur lui-même. Des

charbons de diamètre 20, 22, 26 mm supportaient ainsi des intensités respectives de 125, 150, 200 A, sous des tensions d'environ 70 V, alors que des charbons non tournants du même diamètre n'auraient supporté à l'extrême que 70, 100, 125 A (fig. 4).

La brillance du cratère positif peut varier entre 12 000 et 17 500 sb suivant les

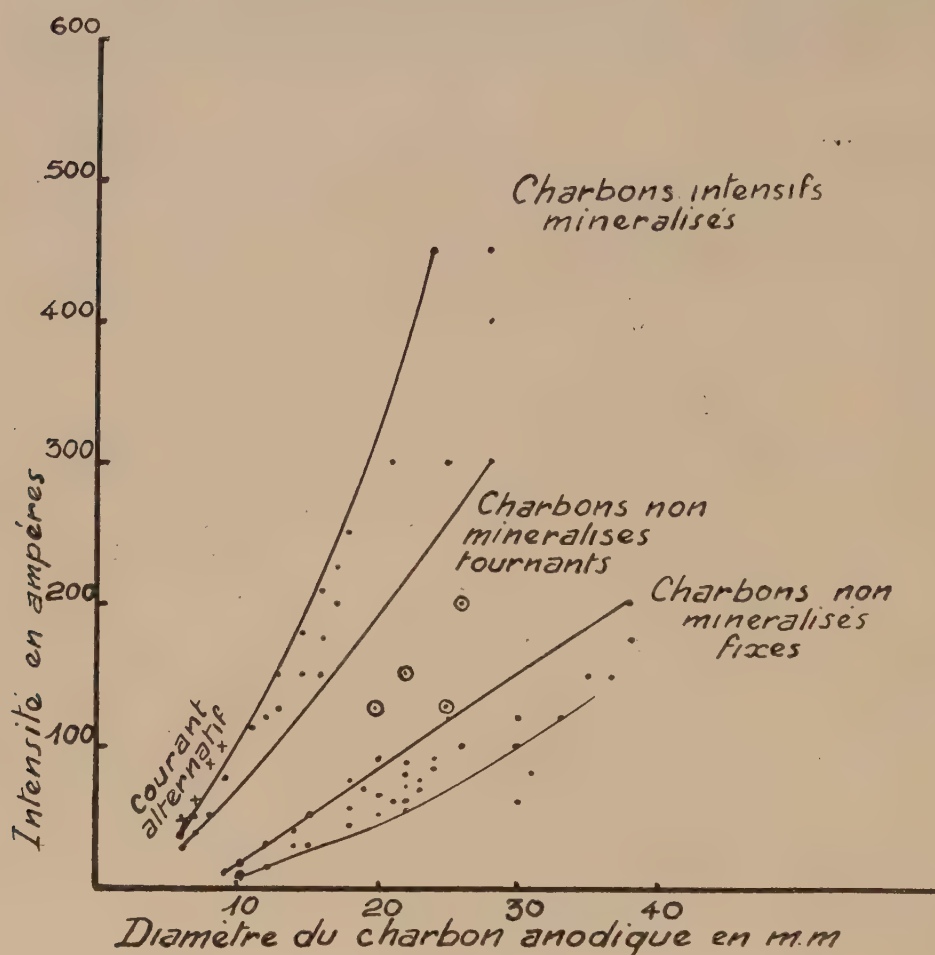


Fig. 4. — Relation entre le diamètre du charbon anodique et l'intensité électrique.

Dans chaque catégorie il existe des qualités adaptées à différentes densités de courant.

espèces et les régimes. Ainsi que nous l'avons dit, elle atteint, avant que l'arc ne devienne instable, une valeur limite qui ne dépend que de la pression ambiante. A la pression atmosphérique, cette valeur varie suivant les auteurs de 15 000 à 17 500 sb. Les travaux récents de GREGOR MORRIS [13] viennent de donner 15 600 sb pour différents charbons à base de noir de fumée et 16 900 sb pour des charbons à base de graphite artificiel ACHESON.

Conditions d'utilisation de charbons non minéralisés Cielor.

Intensité (A.)	Charbon positif (Φ en mm) tous à mèche.	Charbon négatif (Φ en mm).			Tensions usuelles (V).	Long. d'arc (mm).	Observations.
Lampes à charbons superposés.							
	Qualité 252 (1)	Qualité 253 (3)	Qualité 257 (4)				L'emploi d'un charbon négatif de diamètre plus petit et cuivré, ou bien muni d'une mèche cui- vrée, élève le plafond d'emploi de l'appairage.
20-30	16	12	11				
30-40	18	13	13				
40-50	20	14	14		45-55	3-10	
50-60	22	16	15				
60-70	22		16				
70-75	24		16				
	Qualité 252 (2)			Qualité 257 (5)			(1) Nue.
25-45	16			8			(2) Nue.
45-55	18			9			(3) Homogène nue.
50-60	20			9	45-55	5-12	(4) A mèche cuivrée.
55-70	22			9			(5) A mèche cuivrée.
70-85	22			10			
85-120	25			11			
Lampes à charbons horizontaux.							
	Qualité 252 (6)	Qualité 259 (8)	Qualité 257 (9)	Qualité 256 (10)	Qualité 259 (11)		Les charbons positifs type 253 supportent à diamètre égal plus d'in- tensité que les char- bons 252
8-10	9	6					
10-16	10	7					
15-25	12	8		8		45-55	
20-30	13	9		9	6 ou 7	3-5	
	Qualité 253 (7)						
12-18	10	7					
20-25	12	8					
20-30	12				6 ou 7		
15-20	10		7				
18-25	12		7			42-52	
30-32	12		8			3-5	
25-38	13		9		8		
30-40	14		9 ou 10		8		
Lampes avec charbons négatifs inclinés.							
	Qualité 253 (12)		Qualité 257 (13)				Les appairages sont moins poussés que ci-dessus
18-20	11		7				
20-25	12		8				
25-32	13		9		48-55	3-5	
30-35	14		10				
40-45	15		12				
45-50	16		13				
Lampes automatiques de projecteurs.							
	Charbon positif :		Charbon négatif :				
80	Qualité 252 Φ 22 nu		Qualité 253 Φ 11 nu (homogène)		55	6 à 8	Type ancien
120	» 910 Φ 26 nu		» 953 Φ 13 (à mèche cuivrée)		65	15 à 25	Types précédant l'appli-
150	Qualité P. E. A. Φ 36,5 nu		» 953 Φ 14 »		75	40	cation de l'arc intensif
180-200	Qualité 913 Φ 38 nu		» 953 Φ 16 »		75	40 à 60	
200	Qualité 913 Φ 26 nu		» 955 Φ 13 »		75	42	Id. charbon tournant

Fig. 5.

Nous n'étudierons pas plus avant ce type d'arc, qu'on appelle arc non minéralisé, entre charbons dits non minéralisés, quoique les charbons positifs comportent le plus souvent une mèche renfermant 20 % de matières minérales (les Allemands les appellent *Reinkohle*). Les charbons négatifs peuvent également comporter une mèche de charbon cuivrée jouant le même rôle, et augmentant la conductibilité électrique du charbon.

Ce type de charbon est encore utilisé pour la projection cinématographique (en France dans 10 % des salles), la projection de théâtre, la thérapeutique. Ils équipent encore d'anciens projecteurs.

Le diagramme 4 donne les intensités usuelles en fonction du diamètre du charbon positif, et la figure 5 des conditions courantes d'utilisation.

II. — ARC ENTRE CHARBONS MINÉRALISÉS DIT « ARC A FLAMME ».

Le premier type d'arc non minéralisé fut l'arc à flamme employé autrefois pour l'éclairage. Lorsqu'on augmente le taux de matières minérales dans la mèche du charbon positif, la température, donc aussi la brillance du cratère, baissent rapidement à cause de l'absorption d'énergie causée par la vaporisation de ces matières. Cette baisse est d'ailleurs beaucoup plus forte sur la surface de la mèche que sur l'écorce. Si les matières minérales introduites dans la mèche rayonnent dans la partie visible du spectre, les gaz de l'arc deviennent plus éclairants. On choisissait donc des combinaisons de métaux dont le spectre d'arc était riche en radiations visibles, et d'anions favorisant leur vaporisation, telles que les fluorures de calcium et de cérium. Ces métaux, facilement ionisables, permettaient l'allongement de l'arc et son développement, ce qui favorisait le rayonnement lumineux. La forte ionisation rendit possible l'alimentation de l'arc par du courant alternatif (la tension d'arc était abaissée de 50 à 25 V environ). Ces arcs avaient un haut rendement lumineux (0,26 W : bougie), mais la lumière surtout rayonnée par la flamme, dont la brillance était basse (100 à 1 000 sb), ne pouvait être utilement projetée par un système optique, et ne servait qu'à l'éclairage.

De tels arcs entre charbons minéralisés au cérium sont encore utilisés pour la photo-gravure et en thérapeutique. Ils sont intéressants à mentionner, parce que formant la transition entre les charbons non minéralisés, auxquels ils s'apparentent par la basse densité de courant supportée, et les charbons haute intensité, dont ils ont la haute minéralisation.

III. — ARC INTENSIF 150 A/75 V.

Ce type d'arc fut découvert par l'Allemand Heinrich BECK peu avant la première guerre mondiale (Brevet allemand 262.913 de KÖRTING et MATHIESEN, Leipzig. Rejeté par l'Armée allemande, il fut proposé aux États-Unis et mis au point pendant cette même guerre par la firme SPERRY GYROSCOPE Co.

Je décrirai d'abord l'arc intensif le plus connu, de 150 A/75 V, entre un charbon positif de diamètre 16 mm et un charbon négatif de diamètre 11 ou 12 mm.

Ses principaux caractères sont les suivants :

1° Densité de courant anodique très supérieure à celle supportée par un charbon

non minéralisé. Alors qu'un charbon non minéralisé de diamètre 16 supporte au maximum 48 A en régime stable, ce charbon intensif supporte une intensité de 150 A. La densité de courant est donc portée de 0,24 à 0,75 A : mm² de section.

2° Haute minéralisation de la mèche en sels de terres cériques, de l'ordre de 50 %.

3° Brillance très supérieure à celle du charbon non minéralisé en régime stable; alors que la brillance de ce dernier plafonne vers 18 000 sb, celle du charbon intensif peut varier suivant la qualité du charbon et les conditions d'emploi entre 65 000 et 80 000 sb.

Le diagramme 4 donnant les intensités utilisées en fonction du diamètre du charbon positif met en évidence la différence fondamentale entre les deux classes de charbons.

Protection des charbons contre la combustion. — Si l'on fait passer un courant de 150 A dans des charbons de diamètre 16 mm, et à plus forte raison de 11 mm, ils sont portés au rouge par effet JOULE et brûlent. Pour éviter cet inconvénient on a deux moyens à sa disposition. L'un est de recouvrir par galvanoplastie les charbons d'une gaine de cuivre de 0,01 à 0,12 mm d'épaisseur, suivant le régime à lui faire supporter. L'autre est d'amener le courant suffisamment près de la pointe en ignition; on y parvient en serrant les charbons dans les pièces conductrices. Dans sa première lampe, BECK entourait la partie du charbon sortant des pièces d'amenée du courant par une flamme d'alcool ou de gaz destinée à empêcher la combustion, mais, en amenant le courant à une distance de 30 à 50 mm de l'extrémité en ignition, on limite suffisamment l'effilement par combustion.

Les pièces de contact sont généralement constituées par deux mâchoires en cuivre rouge, bronze, nickel, argent, et même charbon (projecteurs anglais). Dans certaines lampes allemandes, le charbon coulisse dans un tube de cuivre recouvert extérieurement et intérieurement de charbon; un poussoir latéral l'appuie contre la paroi. Le meilleur contact est assuré par des mâchoires en argent. Les pièces d'amenées de courant sont souvent refroidies par un courant d'air.

Le cuivrage du charbon positif n'est employé que dans les lampes pour prise de vue cinématographique. Dans les lampes de projecteurs militaires, le courant est toujours amené par des pinces sur le charbon positif, le plus souvent aussi sur le charbon négatif, ou bien ce dernier est cuivré. Dans les projecteurs modernes pour prise de vue cinématographique, le charbon négatif est seul cuivré.

Rotation du charbon positif. — Lorsque le diamètre du charbon positif dépasse 9 ou 10 mm, on obtient difficilement que le cratère se taille perpendiculairement à l'axe du charbon. Nous verrons qu'une taille en biseau à une mauvaise influence sur la brillance du cratère. Pour obtenir une taille régulière, on fait tourner constamment le charbon autour de son axe longitudinal à une vitesse qui peut varier largement, par exemple de 2 à 10 t : mn.

On fait rarement tourner le charbon négatif.

Disposition relative des charbons. — Si l'on place les charbons dans le prolongement l'un de l'autre, la partie cathodique de l'arc heurte violemment les vapeurs sortant du cratère et le régime n'est pas stable. Il faut incliner les charbons l'un par

rapport à l'autre pour obtenir une résultante éloignant les vapeurs de l'anode. Dans sa première réalisation, SPERRY avait incliné le charbon négatif de 15° sur le prolongement de l'axe du charbon positif. Une inclinaison minimum de 25 à 30° est préférable.

Les charbons furent longtemps placés dans un plan vertical. Dans certains projecteurs de guerre, on les place dans un plan horizontal, voire incliné, de manière que le charbon cathodique soit plongeant (*fig. 27 bis*). De cette façon, la flamme qui prolonge l'arc n'est pas dirigée vers le haut, et ne cause pas d'éclairement parasite au pied du but.

Réglage de l'arc. — Si l'on veut obtenir une bonne stabilité de l'arc, donc de la lumière émise, il faut maintenir les extrémités des charbons en positions relatives constantes. D'autre part, le cratère doit être maintenu dans une position fixe par rapport au dispositif optique. On y parvient en commandant l'avance du charbon positif au moyen d'un bilame sur lequel une lentille projette l'image du cratère. Cet appareil est appelé thermostat.

Étant donnée l'importance de ces réglages pour le bon rendement, je crois utile d'en donner un aperçu.

a. Réglage du fonctionnement. — On utilisa pour la première fois dans le projecteur SPERRY le mouvement d'un moteur alimenté aux bornes de l'arc, tournant continuellement, au lieu d'en ouvrir et d'en fermer le circuit au moyen d'un relais. Un électro-aimant, branché en dérivation avec l'arc, agit sur un noyau plongeur, qui peut actionner par l'intermédiaire d'un parallélogramme articulé deux cliquets animés constamment d'un mouvement de va-et-vient. Suivant la position du noyau plongeur, les cliquets restent dans une position moyenne et n'enclenchent rien, ou bien ils enclenchent l'un ou l'autre des deux rochets qui sont taillés en sens inverse. C'est ainsi que se fait l'avance ou le recul du charbon négatif.

Le charbon positif tourne constamment sur lui-même en avançant ou non. L'avance est provoquée par un blocage que commande un électro-aimant placé dans le circuit d'un bilame. Lorsque l'image du cratère, par suite de son recul dû à l'usure, vient tomber sur le bilame, le circuit de l'électro-aimant est fermé.

D'autres constructeurs ont combiné l'action de deux électro-aimants, l'un branché en série, l'autre en dérivation, pour actionner l'avance ou le recul du charbon négatif. On obtient ainsi un réglage plus indépendant de la tension d'alimentation.

Un constructeur français assure le réglage par deux moteurs tournant constamment dans le même sens. L'un a son induit branché aux bornes de l'arc (75 V par exemple), l'autre aux bornes du rhéostat placé en série avec l'arc (35 V par exemple). Leurs inducteurs sont placés en série sur la tension d'alimentation. Ces moteurs actionnent les planétaires de deux trains différentiels. Les planétaires du premier train tournent dans le même sens. Leurs satellites, qui tournent donc à une vitesse égale à la moyenne des vitesses des arbres moteurs, commandent les mouvements rotation et avance du charbon positif.

Les planétaires du deuxième train tournent en sens inverse. Les satellites, immobiles lorsque les vitesses des deux moteurs sont égales, tournent, le cas échéant, dans un sens ou dans l'autre à une vitesse égale à la demi-différence entre les vitesses des deux arbres moteurs. Ils actionnent le charbon négatif. L'ensemble constitue une balance

électromécanique très sensible aux variations de courant et d'intensité, qui maintient constante à un demi-volt près la tension aux bornes de l'arc.

Le charbon positif tourne sur lui-même et avance constamment, mais sa vitesse d'avance est inférieure à la vitesse d'usure. Lorsque le cratère, et par conséquent son image, se sont déplacés suffisamment, le bilame agit en court-circuitant une résistance additionnelle placée en série avec les inducteurs des moteurs. A ce moment, les vitesses d'avance et de rotation augmentent jusqu'à ce que le cratère soit suffisamment avancé. La position est ainsi assurée à 1 mm près.

b. Allumage. — L'allumage peut se faire par le jeu des dispositifs de réglage qui amènent le charbon négatif au contact du cratère et le reculent ensuite. Dans le dernier système décrit, dès qu'on applique la tension, le moteur branché aux bornes de l'arc est surchargé et tourne très vite, tandis que le moteur branché aux bornes durhéostat ne tourne pas; le charbon négatif avance donc très vite. Au court-circuit c'est l'inverse et le charbon négatif recule jusqu'à l'équilibre.

On peut également réaliser l'allumage en rendant le porte-charbon négatif mécaniquement solidaire de l'interrupteur de la lampe. Il est préférable de faire réaliser la manœuvre par un électro-aimant. Par exemple, le porte-charbon négatif oscille et applique au repos la pointe du charbon contre le cratère; un électro-aimant placé en série avec les charbons rappelle le système dès qu'on applique la tension et que le court-circuit a eu lieu.

Enfin, il existe des lampes avec charbon auxiliaire relié électriquement au charbon positif, et qui prend contact à l'extinction avec le charbon négatif. Dès que la tension est appliquée, un électro-aimant déplace le charbon auxiliaire en un temps de l'ordre de $1/2000^e$ de seconde.

Ce dispositif a pour but d'éviter, au moment où le charbon négatif touche le charbon positif en un point, que la dilatation locale provoquée par le dégagement de chaleur fasse éclater le bord du cratère, et cause ainsi une perturbation pendant les premières minutes de fonctionnement.

Alimentation de l'arc. — L'arc est en général alimenté par une dynamo 110 V à caractéristiques spéciales. Une résistance fixe, et souvent un rhéostat de réglage, sont placés en série avec l'arc. Il est commode de se servir du rhéostat d'excitation comme moyen de réglage.

Aspect de l'arc. Impact. Longueur d'arc. — La figure 6 et la reproduction 7 (voir planche) montrent l'aspect d'un tel arc. De la pointe du charbon négatif, jaillit une aigrette qu'on appelle dard, entourée d'un espace sombre et d'un manteau de gaz incandescents. Cette partie cathodique de l'arc peut être largement allongée ou raccourcie sans que l'arc en soit perturbé (15 à 35 mm par exemple).

Les gaz brillants qui jaillissent du cratère avec un certain bruit, se heurtent à l'émission cathodique et s'élèvent, tant sous l'action hydrostatique due à leur température, que sous l'impulsion du dard. En effet, quand les charbons sont placés dans le prolongement l'un de l'autre, ces gaz sont dispersés dans toutes les directions. Dans certains projecteurs, on les aspire dans une buse, ou bien on les disperse par un violent

courant d'air qui n'est pas sans action, ainsi que nous le verrons plus loin, sur la brillance du cratère.

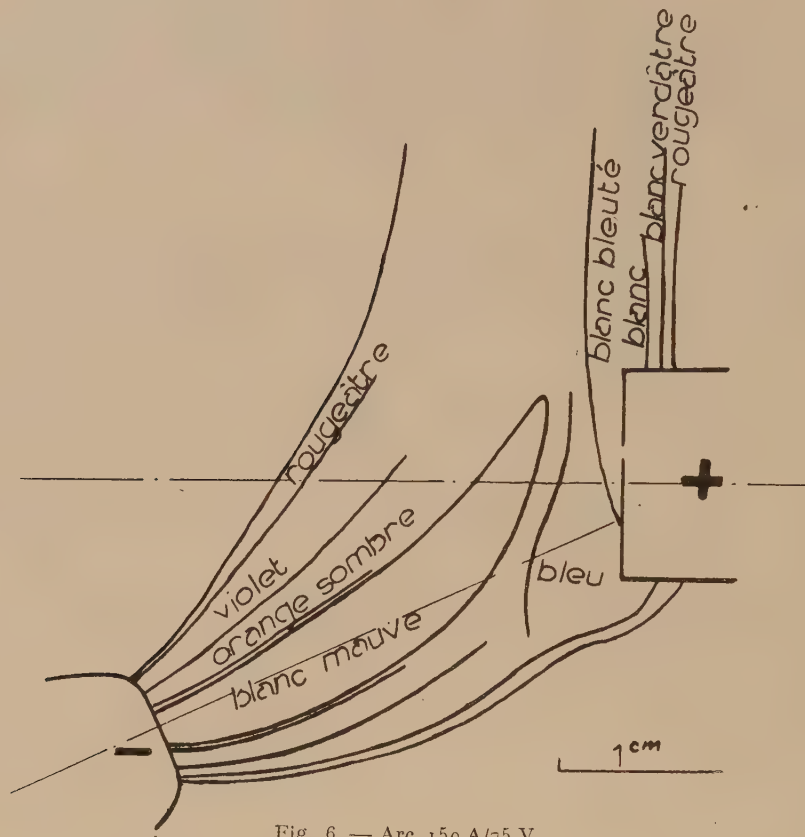


Fig. 6. — Arc 150 A/75 V.

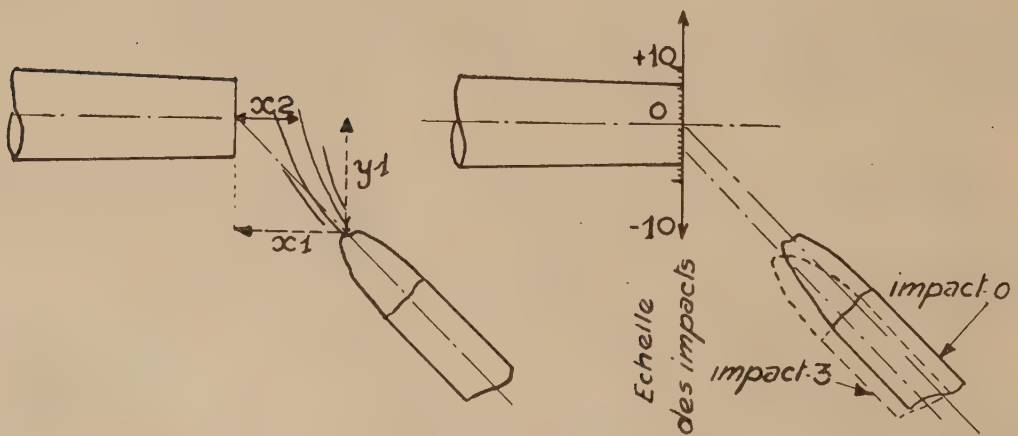


Fig. 8. — Positions relatives des charbons.

Abstraction faite de l'angle que font les deux charbons, et qui peut varier de 15 à 90°, la position relative des deux charbons, caractérisée par l'impact (*fig. 8*), a une grosse influence sur la brillance et la stabilité de la lumière. Il existe une position optimum

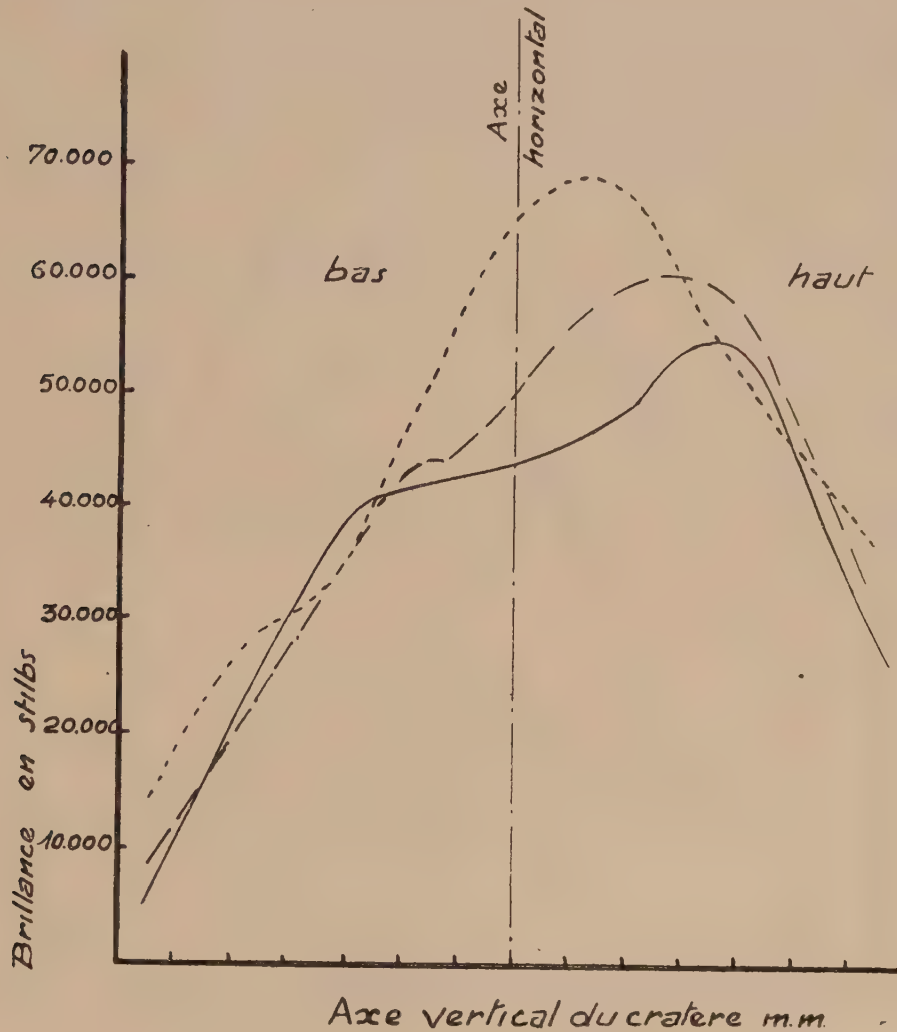


Fig. 9. — Répartition de la brillance sur l'axe vertical.

Charbons Orlux : + 550 Φ 16 mm.; — 555 Φ 11 mm.

150 A/75 V. Angle 30°.

Impact.	Usure horaire (mm).	Cratère.	
		Φ (mm).	Profondeur (mm).
— 4.....	144	13	3
— 2, 4.....	155	13	3
+ 2, 4.....	151	13	4, 5

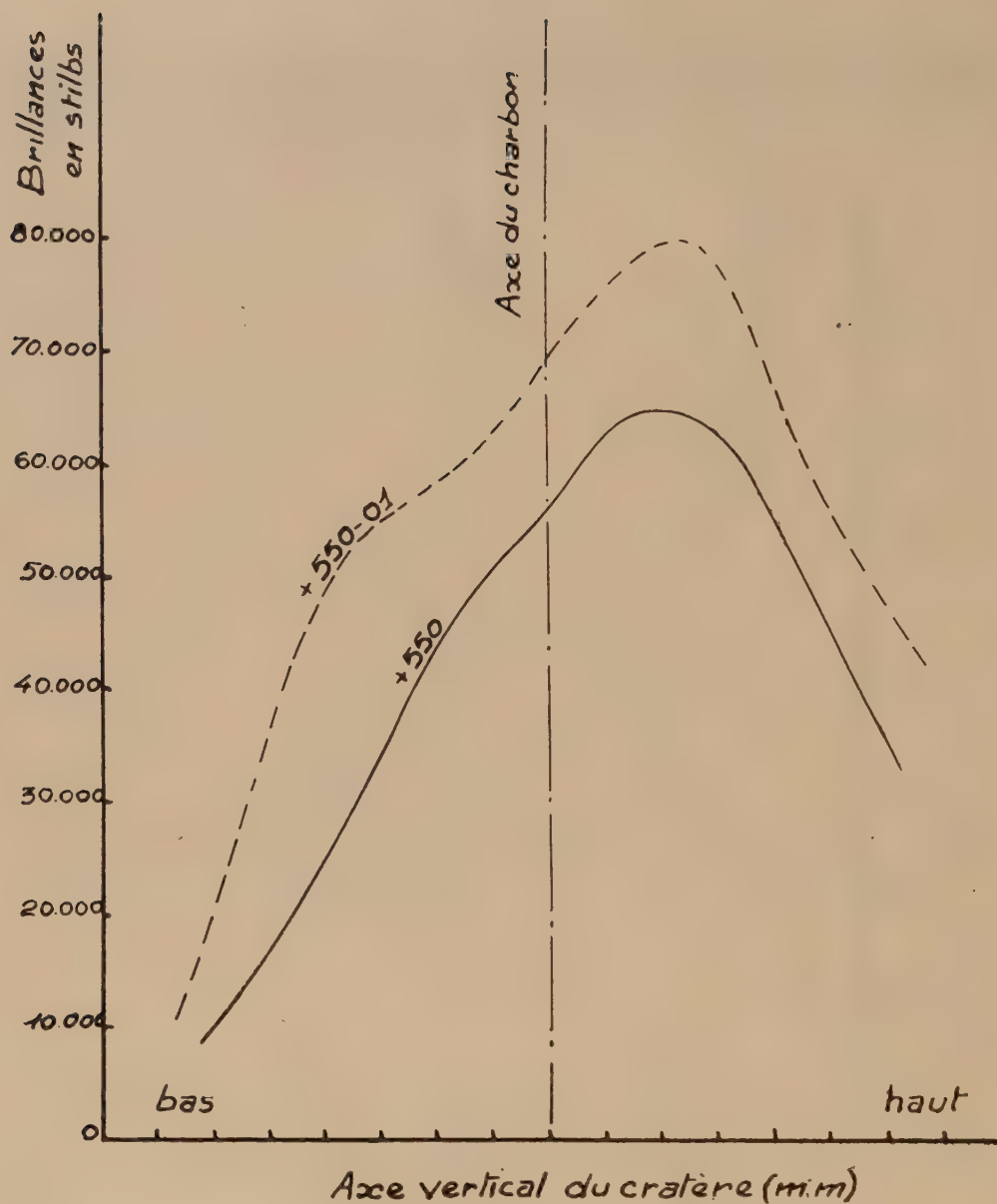


Fig. 10. — Répartition de la brillance sur l'axe vertical.

	Longueur arc (mm).	Usure horaire.		Cratère.	
		+	—	Φ (mm).	Profondeur (mm).
550.....	30	150	64	13	4,5
550-01.....	24	216	64	14	7,5

Angle 30°. Impact + 2,4. 150 A/75 V.
— Φ 11 mm, qualité 555 Orlux; + Φ 16 mm.

—— Qualité 550 Orlux;
----- Qualité 550-01 Orlux.

qui doit être assurée pendant le fonctionnement. La longueur d'arc peut varier dans de larges limites, 20 à 30 mm environ.

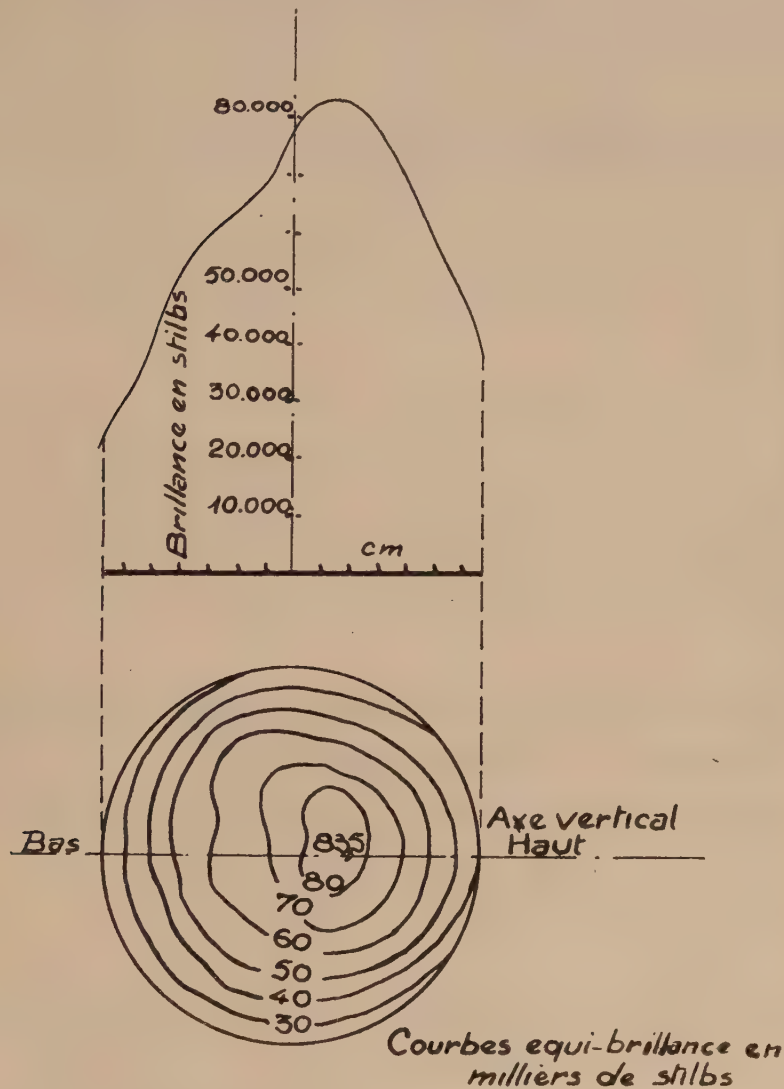


Fig. 11. — Répartition de la brillance sur le cratère.
Charbons Orlux : + 550-01 Φ 16 mm; — 555 Φ 11 mm.
150 A/75 V. Angle 30°. Impact 0.
Intensité dans l'axe calculée : 71 500 bougies.

Importance des charbons. — Le charbon négatif a moins d'importance que le charbon positif, sa mèche est petite et a pour objet de fixer l'arc. C'est du charbon positif que dépend la qualité et la quantité de lumière émise; en général sa mèche a

un diamètre égal à la moitié du sien, et renferme environ 50 % de sels de terres cériques. Je reviendrai plus loin sur les rôles respectifs de son écorce et de sa mèche, en étudiant les variables que ces dernières comportent. Sous l'action de l'arc, son extrémité doit se tailler perpendiculairement à l'axe, et se creuser en forme de paraboloïde de révolution (*fig. 33 bis*).

Résultats obtenus avec l'arc intensif 150 A/75 V. — Le diagramme 10 montre la répartition de la brillance sur la surface du cratère suivant l'axe vertical pour deux

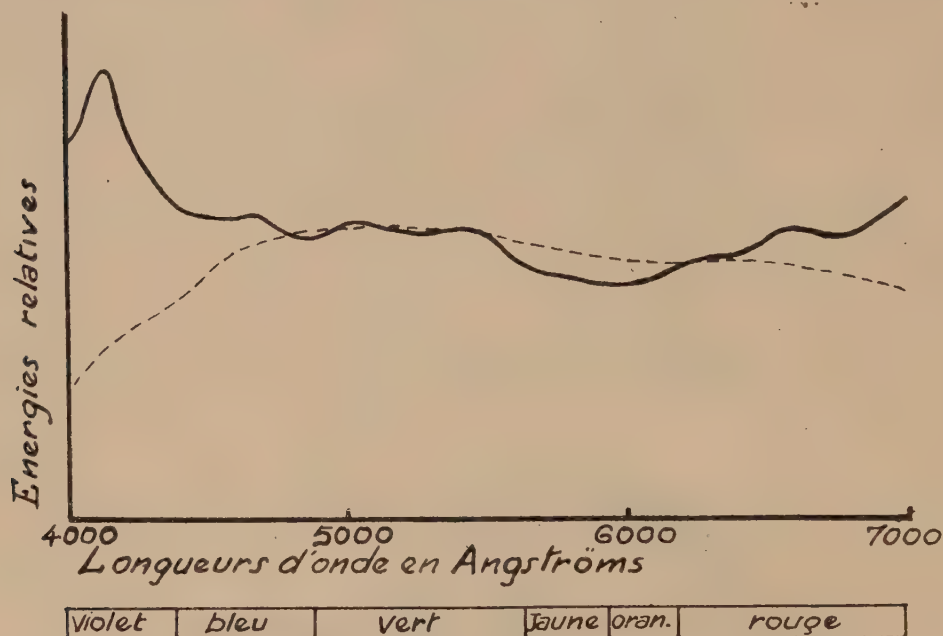


Fig. 12. — Répartition spectrale énergétique.

— Charbon 550 Φ 16 mm. 150 A/70 V.
 - - - - - Soleil moyen à Washington (Abbot).

charbons de la Société « Le Carbone Lorraine ». Le diagramme 11 montre pour l'un des charbons la répartition de la brillance sur la surface du cratère. La caractéristique $V = f(I)$ est nettement montante, et correspond à un accroissement de tension de 0,4 V : A.

La courbe 12 représente la répartition de l'énergie dans le spectre visible.

J'emprunte à BASSETT [19] les valeurs de chutes anodiques et cathodiques d'un arc 150 A/74 V, dont la longueur était de 57 mm et qui ont été déterminées à l'aide de sondes :

Chute anodique contre le cratère.....	13 V
» dans la flamme positive.....	37
» dans la flamme négative.....	15
» cathodique.....	9

Caractères de l'arc intensif. — D'après la description que je viens de faire, les caractères de l'arc intensif sont les suivants : si nous nous rapportons au charbon non minéralisé de 16 mm, qui peut supporter en régime stable une intensité maximum de 48 A, nous voyons que le charbon intensif de 16 mm est trois fois plus chargé, et que sa brillance est environ trois fois supérieure. Les caractères de l'arc intensif peuvent donc être définis provisoirement de la façon suivante :

Arc électrique dont l'anode de charbon a une mèche fortement minéralisée avec des sels de terres rares, supportant en régime stable une densité de courant au moins deux fois et demie supérieure à celle supportée par un charbon non minéralisé, et dont la brillance de cratère dépasse 18 000 sb. A mon avis, le caractère essentiel de l'arc intensif est la brillance élevée du cratère positif. Il faut aussi mentionner la qualité de son rayonnement, correspondant à une température de couleur beaucoup plus élevée, de l'ordre de 5 à 6 000° K, que celle du cratère de l'arc ordinaire (3 700° K).

IV. — ARC INTENSIF A INTENSITÉ INFÉRIEURE OU ÉGALE A 80 A.

L'arc intensif que je viens de décrire fut transposé tout d'abord à des intensités de 120 A, avec positif de Φ 13,6 mm, et 90 A avec positif de Φ 11 mm, pour des usages militaires. On créa ensuite aux États-Unis pour la projection cinématographique des lampes de 65 à 75 A utilisant des charbons positifs de Φ 9 mm. Ces lampes étaient calquées sur la lampe 150 A : charbon positif nu et tournant, charbon négatif cuivré incliné par rapport à l'axe du charbon positif. La brillance maximum du cratère positif était dans tous les cas d'au moins 50 000 sb.

Vers 1933 apparurent sur le marché américain des lampes de projection cinématographiques simplifiées, utilisant des charbons positifs et négatifs cuivrés, placés en positions coaxiales, et supportant de fortes densités de courant :

Diamètre du charbon anodique (mm).	Intensité (A).	Densité de courant (A : mm ² de section).
6.....	30 à 40	1,06 à 1,41
7.....	40 à 50	1,04 à 1,30
8.....	55 à 65	1,10 à 1,29
9.....	70 à 75	1,10 à 1,18
Arc de référence 16.....	150	0,75
Des charbons spéciaux de 16 mm peuvent fonctionner à 210 A.....	210	1,05

Remarquons que ces chiffres n'impliquent pas forcément une charge énergétique supérieure à celle du charbon de 16 mm supportant 150 A. En effet, à densité de courant constante, l'énergie dégagée à la surface du cratère, de même que l'énergie rayonnée par ce dernier, sont approximativement fonction de la section du charbon, donc varient comme le carré du diamètre; par contre, la chaleur perdue par les parois du charbon est fonction de la surface latérale, et croît en conséquence comme son diamètre.

Les charbons positifs ont une mèche de diamètre à peu près égal à la moitié de celui du charbon, et fortement minéralisée aux sels de cérium. Ils sont utilisés à une longueur

d'arc uniforme de 6 mm, avec une tension aux bornes de la lampe de 30 à 40 V suivant l'intensité.

En comparant la chute de tension totale avec les chiffres de chute de tension dans l'arc 150 A/75 V trouvés par BASSETT, les arcs en question semblent différents de l'arc

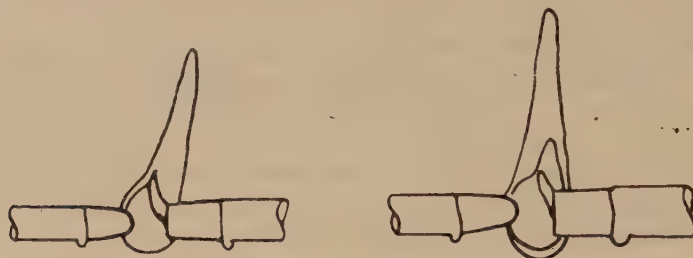


Fig. 13. — Arc intensif sans dard cathodique
(qualités Orlux 544/545).

intensif type. La partie cathodique de l'arc est appauvrie et paraît homogène (*fig. 13*) ainsi que celle d'un arc non minéralisé. La partie anodique, par contre, ressemble beaucoup à celle de l'arc intensif type : une flamme blanche brillante sort du cratère et la brillance de ce dernier est du même ordre de grandeur (40 000 à 70 000 sb). Bien que la chute de tension dans la flamme positive soit inférieure à celle de l'arc 150 A/75 V, les phénomènes anodiques sont identiques dans les deux cas.

La position coaxiale des deux charbons simplifie beaucoup le réglage. La stabilité de l'arc pourrait être affectée par l'opposition des jets de vapeurs émanant des deux charbons, si l'on n'y remédiait pas très facilement par un léger soufflage magnétique (*fig. 14*) tendant à pousser l'arc vers le haut, et paralysant ses déplacements acci-

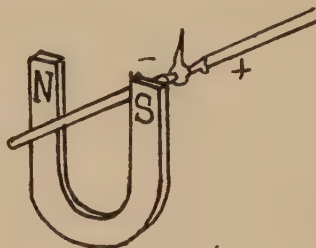


Fig. 14. — Soufflage magnétique.

dentels. Vers 80 A, des phénomènes cathodiques, dont il sera question plus loin, prennent naissance, et compromettent la stabilité de l'arc, aussi les intensités utilisables avec des charbons coaxiaux sont-elles en général limitées à la valeur de 75 A pour les arcs courts.

Étant donnée la grande vitesse d'usure des charbons, les lampes dans lesquelles on les utilise doivent être munies d'un dispositif d'avance automatique. Le courant est

fourni soit par des groupes convertisseurs dont la dynamo a des caractéristiques spéciales, permettant de n'intercaler qu'une résistance additionnelle très faible, soit par des redresseurs triphasés.

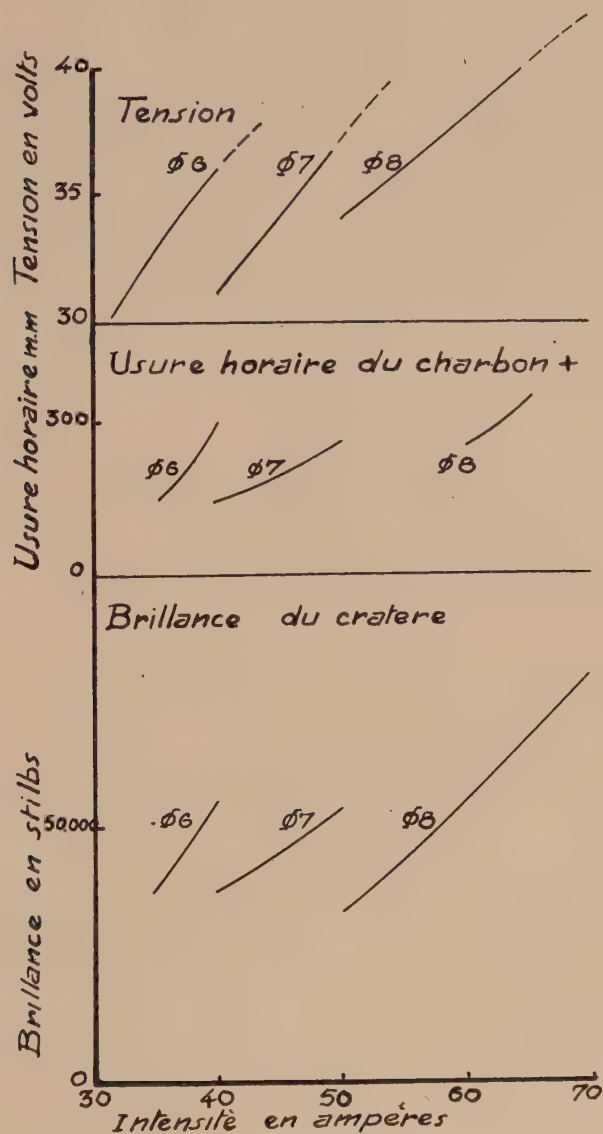


Fig. 15. — Arc intensif sans dard cathodique.
Appairages 544/545 cuivré Orlux. Position horizontale $\pm$ —. Longueur d'arc 6 mm.

Des données relatives à ces arcs, brillance et tension en fonction de l'intensité, font l'objet de la figure 15.

V. — ARC INTENSIF, SUR COURANT ALTERNATIF.

Je passerai rapidement sur ce type d'arc, encore utilisé en France pour la projection cinématographique dans 15 à 20 % des salles.

L'arc est produit entre deux charbons cuivrés du type intensif placés en position horizontale dans le prolongement l'un de l'autre. La densité de courant est très élevée : 80 A efficaces pour des charbons de Φ 8 mm, soit 1,59 A : mm², mais la tension d'arc n'est que de 25 à 27 V pour un écartement de 8 mm. De ce fait, l'énergie dégagée sur le cratère est bien moindre, et le charbon est moins chargé qu'en courant continu : cratère peu creux, usure faible. La tendance à l'allongement de la pointe, seule, est plus grande, parce qu'elle dépend surtout de l'effet JOULE.

L'arc a un axe de symétrie (*fig.* 16). La partie médiane est bleuâtre et peu éclai-



Fig. 16. — Arc intensif courant alternatif.

Orlux 542 Φ 8 mm. 85 A/26 V.50 p.

rante. Les régions voisines des cratères rappellent l'aspect de l'arc intensif, des vapeurs blanches et brillantes s'échappent de la mèche. Le système optique n'utilise que la lumière émise par l'un des cratères.

La brillance du cratère varie bien entendu avec la fréquence du courant. Les courbes 17 relevées par M. PERRIN, montrent comment la brillance varie avec l'intensité et la tension. La fréquence du courant étant de 50 p, et la fréquence de projection étant théoriquement de 24 images par seconde ⁽¹⁾, mais pouvant varier autour de cette valeur, il se produit des battements dont les harmoniques inférieures sont parfois visibles. L'œil perçoit alors plus les variations de teinte que les variations d'éclairement de l'écran. La presque totalité de la lumière recueillie par le miroir est celle émise par le charbon placé à son opposé. Lorsque ce charbon est cathode, et à plus forte raison lorsque le courant s'annule, la lumière qu'il émet apparaît par contraste rougeâtre par rapport à celle qu'il émet lorsqu'il est anode. Un transformateur rotatif avec multiplication de la fréquence a été réalisé aux États-Unis pour supprimer cet inconvénient ⁽²⁾.

L'alimentation est d'ordinaire effectuée par un transformateur à fortes fuites. Les lampes comportent une avance automatique, généralement actionnée par un relais d'intensité.

⁽¹⁾ Fréquence d'obturation 48.

⁽²⁾ L'utilisation de trois charbons alimentés en courant triphasé, et dont les cratères sont dirigés vers le miroir, peut donner une solution intéressante.

Les intensités utilisées sont de 40 à près de 100 A efficaces; à cette intensité, les phénomènes cathodiques de pincement n'apparaissent pas.

Le tableau ci-dessous donne les conditions d'utilisation des charbons.

Diamètre (mm).	Intensités efficaces (A).	
6.....	40 à 45	Longueur d'arc 6 à 8 mm Tension 25 à 27 V } Brillance de l'ordre de 30 000 sb
7.....	55 à 60	
8.....	75 à 80	
9.....	80 à 100	

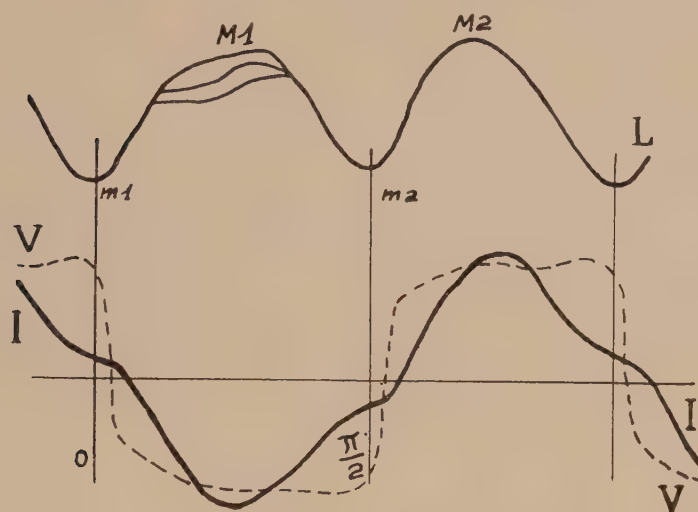


Fig. 17. — Arc intensif courant alternatif.

Charbons Φ 8 mm. 80 A/27 V.
 Courbes lumière, intensité, tension.

Malgré les inconvénients signalés, variation de teinte et non-utilisation de la moitié de la lumière émise par les cratères, la simplicité de l'installation a assuré à ce type d'arc un certain succès.

CHAPITRE II.

APPRÉCIATION DE LA LUMIÈRE ÉMISE PAR UN ARC.

I. — STABILITÉ DANS LE TEMPS.

La lumière émise par un arc peut subir des fluctuations de fréquence et d'amplitude très variables. S'il s'agit d'éclairer un but au moyen d'un projecteur, les fluctuations gênantes sont réduites à celles que l'œil saisit. S'il s'agit de prise de vue ou de projection cinématographique, il peut se produire des effets stroboscopiques, et une perturbation périodique imperceptible à l'œil peut causer des battements visibles d'intensité lumineuse. Les perturbations périodiques proviennent en général de la tension d'alimentation (commutation défectueuse, ovalisation du collecteur de la dynamo).

Les perturbations lumineuses dues aux charbons sont rarement périodiques. Il arrive cependant que l'arc intensif ne soit pas stable, et que la lumière passe périodiquement par un minimum et un maximum avec une fréquence de plusieurs secondes. Ce phénomène, que j'étudierai plus loin, ne doit pas se produire avec des charbons correctement fabriqués, à condition que la densité de courant soit suffisante, et que les caractéristiques électriques du générateur soient convenables.

Les perturbations accidentelles dues à l'imperfection des charbons sont de durées variables, leurs causes sont nombreuses : déflagration dans le cratère avec ou sans projection de matière, vaporisation irrégulière des matières de la mèche, apparition d'une fissure dans la paroi du cratère, usure non symétrique de ce dernier, amorçage intempestif de l'arc sur des impuretés contenues dans l'écorce. Un bon charbon doit être exempt de ces défauts; il faut donc être en mesure de les déceler.

Toute variation de la lumière est accompagnée d'une variation plus ou moins grande des caractéristiques électriques. L'enregistrement d'un diagramme de tension renseigne donc sur la constance de la lumière. Les variations d'intensité sont généralement moins aiguës, mais l'emploi d'un transformateur à haut rapport, relié à un voltmètre enregistreur, permet d'augmenter la sensibilité de la mesure. Quoi qu'il en soit, il était logique de chercher à enregistrer directement les fluctuations de la lumière.

Un dispositif construit par la Maison BEAUDOIN enregistre simultanément les courbes d'intensité lumineuse, d'intensité électrique, et de tension électrique. La lumière impressionne une cellule à couche d'arrêt type 3002 de la Société Le Matériel téléphonique, qui est reliée à un galvanomètre de l'Association d'ouvriers en instruments de précision, de période propre 0,045, dont le cadre de 90 Ω est shunté par

une résistance de $20\ \Omega$. Deux oscillographes à goutte d'huile, l'un de $38\ \Omega$, fréquence propre 40, l'autre de $600\ \Omega$, fréquence propre 120, sont actionnés respectivement par l'intensité et par la tension électrique. Ces trois appareils projettent simultanément leur spot sur un papier photographique dont la vitesse de déroulement est réglable entre 0,5 et 10 mm : s. Une variation de lumière peut être due, soit à une perturbation d'arc d'origine interne, soit à une variation de la tension d'alimentation. L'examen des trois courbes permet de faire la discrimination. Si la tension et l'intensité ont varié dans le même sens, la perturbation était d'origine externe, et inversement (*fig. 18*, voir planche).

II. — QUANTITÉ ET QUALITÉ DE LA LUMIÈRE.

Lorsqu'il s'agit d'éclairer un but, ou de faire une projection de film noir et blanc, la quantité de lumière est à considérer en premier lieu; sa teinte est d'importance non négligeable, mais secondaire. S'il s'agit de projeter un film en couleur, ce n'est plus seulement la quantité de lumière qui importe, mais aussi sa répartition énergétique; la température de couleur de la source idéale est alors de 5300°K . Enfin, pour l'impression d'une couche photo-sensible, la composition spectrale de la lumière est de première importance.

Les mesures quantitatives doivent donc comporter à la fois des mesures photométriques et des mesures spectrophotométriques.

Parmi les différentes mesures photométriques qu'on peut effectuer sur un arc électrique, c'est la mesure de la lumière utilisée par le système optique, et envoyée sur le but à éclairer, qui est la seule intéressante. Or, qu'il s'agisse de projection militaire ou de projection cinématographique, c'est le rayonnement du cratère qui est exclusivement utilisé, et encore la partie de ce rayonnement émise par les régions marginales est-elle d'intérêt faible dans le premier cas, et nul dans le second. Quant au rayonnement de la flamme, il est non seulement perdu dans tous les cas, mais il est gênant pour la projection militaire ou marine.

La mesure brute de l'intensité lumineuse présente donc peu d'intérêt. Je donne cependant, à titre d'indication, une courbe polaire de répartition de cette intensité (*fig. 19*). A concentration égale du flux sur le but, l'éclairement de ce dernier dépend de la brillance du cratère en grandeur et en répartition. Nous verrons comment on procède aux mesures de brillance.

Connaissant la répartition de brillance sur le cratère, il s'agit de savoir quel sera le flux tombant sur un système optique donné. En toute rigueur, il faudrait connaître la répartition de l'intensité lumineuse émise par le cratère seul dans l'angle solide défini par l'entrée du système optique et le cratère. Pratiquement, on fait une approximation grossière en admettant que l'émission de lumière suit la loi de LAMBERT, et l'on procède de la façon suivante. La figure 11 est un exemple de répartition sur la surface d'un cratère de la brillance mesurée dans l'axe. A l'aide d'un planimètre, on mesure les aires comprises entre les courbes, auxquelles on affecte une brillance égale à la moyenne arithmétique de celles des courbes limites. Le produit de la brillance par la surface donne l'intensité lumineuse dans l'axe pour chaque aire, et la somme de ces produits représente l'intensité lumineuse totale dans l'axe. Si les brillances sont expri-

mées en stilbs, les surfaces en centimètres carrés, les intensités sont obtenues en bougies. Le flux utile théorique exprimé en lumens sera obtenu en multipliant cette valeur par l'angle solide dans lequel la lumière est utilisée.

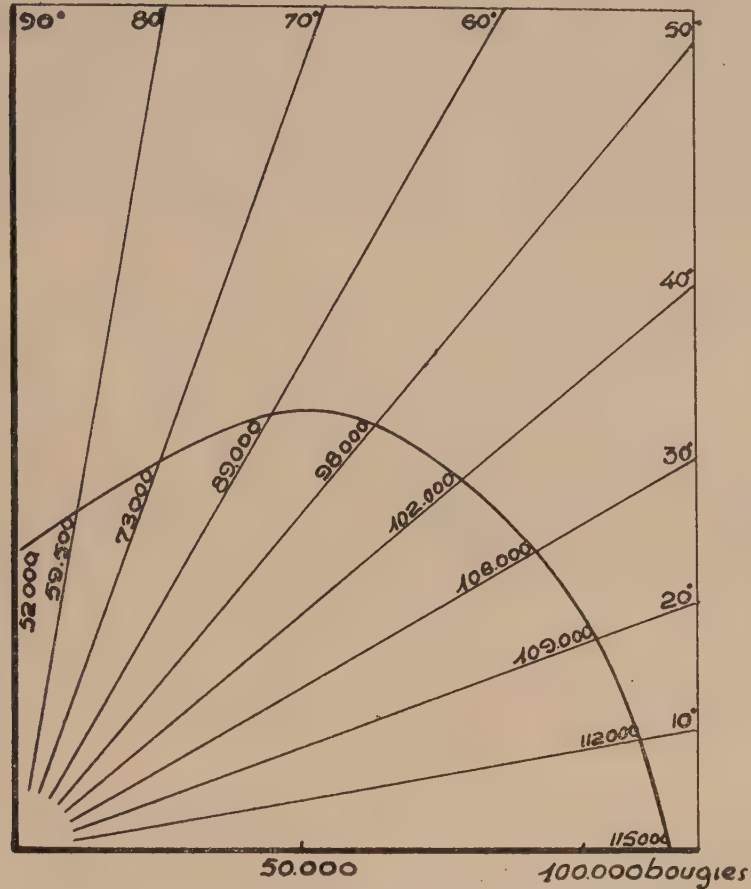


Fig. 19. — Courbe polaire d'intensité lumineuse.
Plan horizontal.

Charbon + 550-01 Φ 16 mm. 150 A/75 V (marque Orlux).

III. — RENDEMENT.

Le rendement peut s'exprimer en lumens par watt. Lorsqu'on se servait de l'arc flamme pour l'éclairage, on exprimait le rendement en prenant pour base la lumière émise dans la demi-sphère. LEBLANC [18] donne pour ce type d'arc 20 à 25 lm : W. D'après PATZELT [20] le rendement lumineux de l'arc intensif serait de 22 lm : W contre 20 pour l'arc non minéralisé. KALB [21] pour un arc intensif 35 à 40 A/37 V

dont on utilise toute la lumière donne 43,5 lm : W. Les chiffres de FINKELNBURG [88], basés sur le flux total émis, varient entre 50 et 60 lm : W pour des charbons normalement chargés, contre 20,8 pour un charbon non minéralisé.

Si l'on considère la courbe polaire 19 relative au plan horizontal, et qu'on admette qu'elle représente la répartition dans tous les plans, son intégration conduit à un flux de 548 000 lm dans la demi-sphère. Le rendement est alors de 48 lm : W.

Comme l'angle maximum cratère miroir est d'environ 120°, il est intéressant de comparer les rendements de quelques charbons usuels en considérant le flux émis dans l'angle solide correspondant. La figure 19 bis est établie en partant de la courbe de répartition de brillance, et en considérant que le cratère suit la loi de LAMBERT. C'est une approximation grossière, et les résultats, qui représentent des ordres de grandeur, ont surtout un caractère comparatif.

Rendement rapporté à un angle solide correspondant à 120° d'ouverture.

Charbon anodique.	Intensité (A).	Tension (V).	Brillance maximum (sb).	Brillance moyenne (sb).	Surface de cratère (cm²).	Intensité lumineuse (bougie).	Flux (lm).	Puissance diss. (W).	Lumens par watt.
550 • Φ 16...	150	75	65 000	43 700	1,32	57 684	138 442	11 250	12,3
550-01 Φ 16...	150	75	83 000	50 000	1,43	71 500	171 600	11 250	15,2
591-10 Φ 19...	250	85	87 500	52 000	2,28	118 560	284 544	21 250	13,4
Φ 9.....	65	65	51 000	35 500	0,282	10 011	24 026	4 225	5,7
	75	65	69 500	46 000	0,343	15 778	37 867	4 875	7,9
	110	68	142 500	80 000	0,565	45 200	108 480	17 480	6,2

Fig. 19 bis.

FINKELNBURG et SCHLUGE [47] ont étudié le rendement énergétique (flux recueilli dans un calorimètre) pour des charbons Φ 5, 7, 9, 11 mm. A part le Φ 5, ce rendement, qui est rapporté à l'énergie fournie à l'anode, est une fonction linéaire de cette dernière valeur, et ne dépend pas de l'intensité ni du diamètre. Elle se monte à $71 \pm 3 \%$.

IV. — PHOTOMÉTRIE.

Principe. — Une lentille L (fig. 20 et 21) centrée sur l'axe du charbon, projette une image réelle agrandie du cratère dans le plan du photomètre. Le grandissement est choisi de façon que la plage du photomètre puisse être considérée comme ayant une brillance uniforme. Après avoir mesuré la valeur de l'éclairement de la plage du photomètre, le calcul suivant permet de passer à la valeur de la brillance de la surface émissive.

Soient :

s, l'élément de surface émissive dont la brillance est B;
 σ , la surface du diaphragme placé devant la lentille L;

p et p' , les distances respectives du cratère à la lentille et de la lentille au photomètre;
 τ , le coefficient de transparence de la lentille;
 e , l'éclairement mesuré.

L'intensité lumineuse émanant de l'élément s est B_s . Le flux tombant sur le diaphragme a pour valeur $B_s \Omega$, Ω étant l'angle solide dont le sommet est l'élément s et la

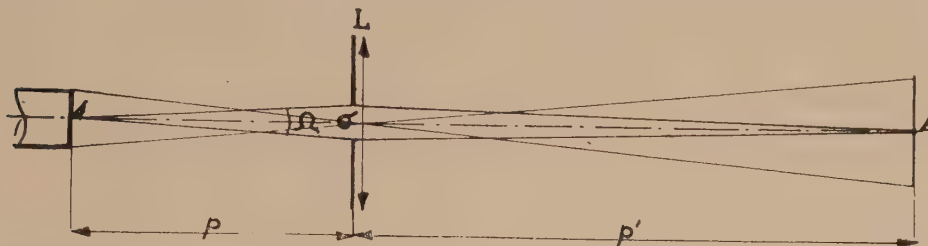


Fig. 20.

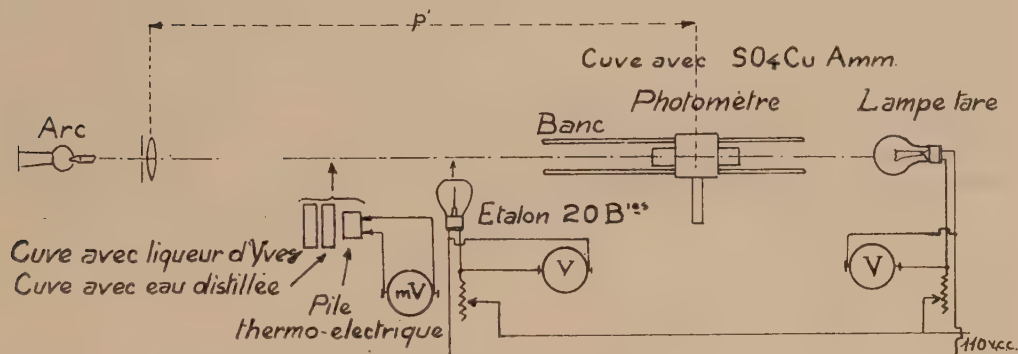


Fig. 21. — Mesure de brillance.

base la surface σ , Ω a pour mesure $\frac{\sigma}{p^2}$. Le flux traversant σ , s'exprime donc par $\frac{B_s \sigma \tau}{p^2}$.

L'éclairement produit est donc

$$e = \frac{B_s \sigma \tau}{p^2 s'} \quad (s' \text{ étant l'image de } s),$$

comme $\frac{s}{s'} = \frac{p_2}{p'^2}$, e devient $\frac{B \sigma \tau}{p'^2}$, et l'on peut tirer la valeur

$$B = \frac{e p'^2}{\sigma \tau}.$$

Si e est exprimé en flux, p' en mètres, σ en centimètres carrés, B est obtenu en stilbs.

Mise en œuvre. — Lorsque, vers 1928, le Laboratoire de PAGNY-SUR-MOSELLE s'équipa pour faire des mesures de brillance, les photomètres physiques n'étaient

pas d'un emploi courant. Il fallait donc comparer visuellement la lumière émise par le cratère à celle d'un étalon à incandescence. Or, les teintes de ces deux lumières sont fortement hétérochromes, et l'on sait que, dans ces conditions, la comparaison est imprécise; de plus, les variations périodiques de brillance du cratère tournant auraient rendu les mesures très difficiles.

On procéda par double pesée, c'est-à-dire en tarant le flux de l'arc avec celui d'une lampe à incandescence puis substituant l'étalon à la source à mesurer. La lumière de la lampe tare était bleuie au travers d'un filtre à liqueur cupro-ammoniacale, de manière que sa teinte fût voisine de celle de la lumière de l'arc. De toute façon, la comparaison avec le cratère était rendue à peu près homiochrome, tandis que la comparaison avec la lampe étalon était hétérochrome. Sur les conseils de M. FABRY, et bien que la Commission d'Études d'Optique et de Télémétrie de la Marine possédât à cette époque un photomètre à scintillations, on choisit comme instrument de comparaison un photomètre type LUMMER-BRODHUN à double contraste.

Pour la comparaison du cratère et de la lampe tare, on faisait les pointés en ramenant successivement le photomètre plus loin et plus près, et l'on saisissait bien ainsi l'égalisation des éclaircissements. On procédait ensuite en toute tranquillité, et par la même méthode à la comparaison de la lampe tare avec la lampe étalon. L'expérience a montré que les mesures ainsi faites par trois expérimentateurs exercés se recoupaient à moins de 5 % près.

Le photomètre à double contraste ayant été détruit en 1944, trois solutions pouvaient être envisagées : rétablir l'installation d'avant-guerre, conserver la méthode visuelle en se servant d'un photomètre à scintillations, s'adresser à une méthode purement physique.

Une méthode purement physique est utilisée au Centre de Recherches de Marseille. La comparaison entre le cratère et l'étalon à incandescence y est faite au moyen d'une cellule photoélectrique, dont la sensibilité sélective est rendue voisine de celle de l'œil au moyen d'un filtre convenable.

Bien que cette méthode soit rigoureuse, j'ai préféré conserver une méthode visuelle, et faire usage du photomètre à scintillations conçu par M. BLET [23] et construit par l'Omnium scientifique et industriel.

Les mesures auxquelles j'ai procédé m'ont montré qu'il n'était plus nécessaire de bleuir la lumière de la lampe opposée à l'arc. J'ai conservé la méthode de double pesée, d'une part pour ménager la lampe étalon, et d'autre part, pour pouvoir disposer d'une grande gamme de sensibilités, en faisant varier l'intensité de la source servant de témoin.

Les chiffres de brillance donnés dans le présent travail ont été obtenus par l'ancienne méthode, l'opérateur étant en général M. PERRIN, ceux relatifs à la lampe intensive à charbons horizontaux ont été trouvés par moi avec une installation provisoire comportant le photomètre BLET. Voici les données relatives à ces dernières mesures :

Distance cratère-lentille.....	0,50 m environ
Distance lentille-photomètre	10 à 15 m
Diaphragmes utilisés.....	2,5 et 3 mm de diamètre
Cellule L. M. T. diaphragmée à 8 mm, corrigée par un filtre Viscor fourni par L. M. T.....	-
Diaphragme du photomètre.....	7,5 mm
Fréquence de scintillations.....	13 par seconde

Mesure de la brillance sur la surface du cratère. — La mesure au photomètre étant longue, il fallait disposer d'un instrument de mesure physique permettant l'exploration rapide de la surface du cratère. Généralement on se borne à relever la brillance sur l'axe vertical en effectuant une mesure par millimètre.

Dès 1928, on utilisa pour explorer le cratère une pile thermoélectrique du Dr MOLL reliée à un galvanomètre. Un filtre liquide placé devant les soudures modifiait la sensibilité de la pile aux différentes radiations de manière à l'amener à être voisine de celle de l'œil. Ce filtre, préconisé par IVES [24], se composait de deux cuves de verre renfermant sous 1 cm d'épaisseur, la première de l'eau distillée, la seconde une solution de la composition suivante :

Chlorure cuivrique.....	61,25 ^g
Sulfate double de cobalt et d'ammonium	14,5
Chromate neutre de potassium.....	1,9
Eau distillée Q. S. pour 1 l	

La pile et son filtre pouvaient être placés devant le photomètre, de façon que le flux tombant alors sur ses soudures fût approximativement le même que celui couvrant la plage du photomètre. Un support mobile permettait de déplacer la pile et son filtre afin d'explorer les différentes régions du cratère.

On commençait par faire des mesures de base avec le photomètre, puis avec la pile thermo-électrique qu'on lui substituait. Les déviations du galvanomètre pouvaient aussi être étalonnées en brillances. La pile était ensuite déplacée sur l'axe vertical, et mise en station en des positions correspondant à des écarts de 1 mm sur le cratère.

Voici quelques données relatives à cette mesure (*fig. 21*) :

Distance lentille-diaphragme	0,50 m
Diamètre du diaphragme environ	4 mm
Distance lentille-pile thermo-électrique	10 m
Distance lentille-photomètre aux environs de.....	13 m
Diamètre de la surface sensible de la pile.....	20 mm
Diamètre de la plage du photomètre environ	30 mm
Photomètre à double contraste LUMMER-BRODHUN.....	
Pile thermo-électrique du Dr MOLL.....	80 éléments
Galvanomètre Cambridge à suspension	0,3 mV 17,3 Ω

Enregistrement des courbes de brillance. — L'emploi du photomètre physique suggère l'enregistrement direct de la courbe de brillance. On peut ainsi avoir une idée précise des fluctuations, et améliorer en même temps la précision de la mesure.

La figure 22 représente le dispositif d'enregistrement que j'ai réalisé en 1940 avec M. GAMEL. L'élément sensible était relié à un galvanomètre projetant son spot sur une fente, derrière laquelle pouvait se mouvoir un tambour portant une feuille de papier photographique. Le mouvement de ce tambour était rendu solidaire de celui de l'élément sensible; à chaque position du papier correspondait donc un point de l'axe vertical du cratère.

L'emploi d'une pile thermo-électrique présente un inconvénient. Par suite de l'énergie calorifique qui s'accumule, le courant de zéro n'est plus nul quand on effectue la mesure de fermeture. Ce défaut est supprimé si l'on remplace la pile thermo-électrique par une

cellule à couche d'arrêt. La cellule L. M. T. 3 002 B que nous utilisions avait un zéro stable, d'autant plus que les éclairagements étaient de l'ordre de quelques lux seulement. Il était nécessaire de modifier la sensibilité sélective de la cellule aux radiations de différentes longueurs d'onde, de manière à la rendre voisine de celle de l'œil. Sur le

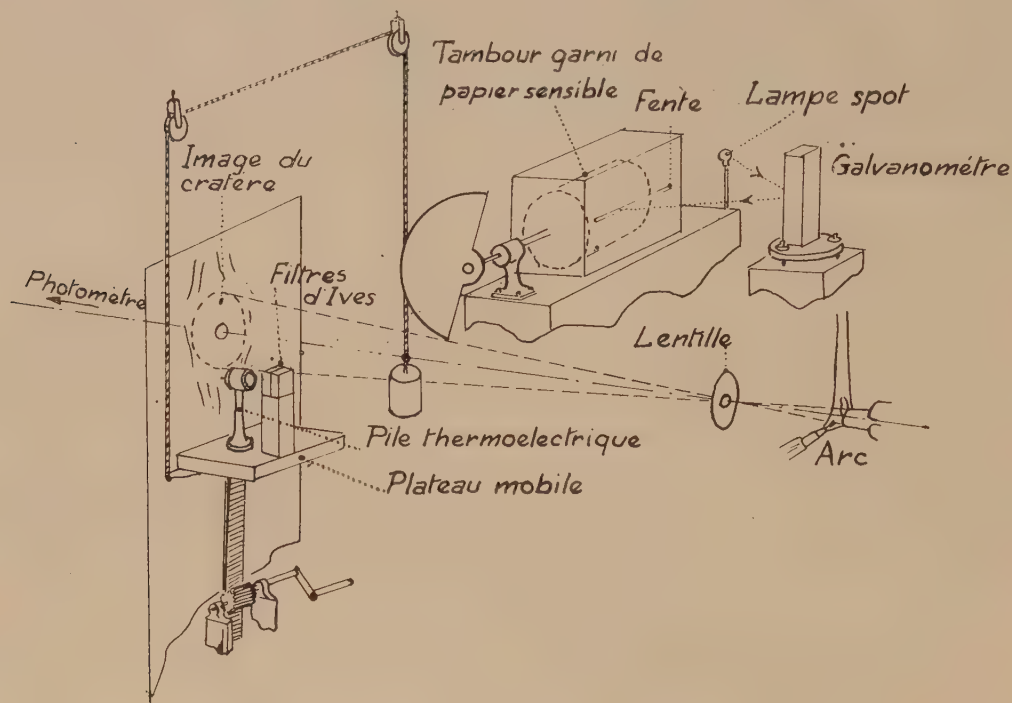


Fig. 22. — Inscription photographique des courbes de brillance.

conseil de M. le Professeur FLEURY, nous effectuons cette correction par la liqueur mise au point par DJOUDAT [25], dont voici la composition :

Sulfate de cuivre cristallisé.....	25 g
Dichromate de potassium	1
Eau distillée	1000
Epaisseur	2 cm

Les figures 23 (voir planche) reproduisent des enregistrements ainsi obtenus. Le mouvement de translation de la cellule était sensiblement uniforme; les variations périodiques autour de la valeur moyenne correspondent à la rotation du charbon positif.

Le dispositif d'essais, tel qu'il est représenté sur la figure 22, va être réalisé de façon plus robuste. Le filtre liquide sera remplacé par un filtre de verre « Viscor » spécialement adapté à la cellule L. M. T. 3 002 B. La courbe de sensibilité de l'ensemble cellule-filtre publiée par la Société L. M. T. est très voisine de celle de l'œil moyen. L'imperfection de la correction n'a d'importance qu'autant que la distribution spectrale énergétique de la lumière change. Or, cette dernière change surtout lorsqu'on passe de la

zone de la mèche à la zone de l'écorce, qui est de brillance basse, et dont l'émission lumineuse est peu utilisée en pratique.

En résumé, voici la méthode la plus pratique pour déterminer la répartition de la brillance sur la surface d'un cratère de charbon d'arc. Procéder, pour la zone la plus brillante, à une mesure photométrique visuelle à l'aide du photomètre à papillottements. Prendre alors un photomètre physique convenablement corrigé en fonction de la sensibilité de l'œil moyen, et explorer la surface du cratère. Comme la température de couleur de la lumière émise par un arc est fonction de multiples facteurs, et que la correction de sensibilité d'un photomètre physique n'est jamais parfaite, il est prudent de procéder dans chaque cas à une mesure photométrique visuelle de base.

V. — SPECTROPHOTOMÉTRIE.

Procédé photographique. — Depuis 1928, le laboratoire de Pagny-sur-Moselle possède un sensitomètre JOBIN et YVON qui est utilisé comme spectrographe; il se compose essentiellement d'un réseau projetant le spectre d'une fente éclairée sur une pellicule cinématographique. Cet appareil permet de comparer l'actinisme des arcs par rapport à une pellicule sensible. La mesure exacte de l'opacité des spectres obtenus aurait nécessité l'emploi d'un microphotomètre enregistreur que nous possédons maintenant, mais l'interposition du coin dégradé dont est muni l'appareil permet de faire de visu des comparaisons de précision passable (*voir* planches, *fig.* 24). Quoi qu'il en soit, les résultats dépendent de la sensibilité de la pellicule, et les corrections nécessaires pour passer à des mesures absolues sont longues.

Procédé par mesure directe d'énergie. — En 1936, M. le Professeur CHEVALIER me conseilla d'explorer directement un spectre à l'aide d'une pile thermo-électrique. M. BAROIN appliqua cette idée. Il réalisa un montage et l'utilisa jusqu'en 1939; l'appareil se composait essentiellement d'une fente réglable, d'une lentille et d'un prisme de flint. Une pile thermo-électrique à diaphragme réglable était mise en station en plusieurs endroits du spectre. Le galvanomètre relié à la pile indiquait en valeurs relatives les quantités d'énergie admises sur les soudures. Les valeurs brutes devaient être corrigées en tenant compte de la transparence relative du prisme, et du fait que le spectre prismatique est resserré vers les grandes longueurs d'onde. En effet, la loi de dispersion est de la forme $A + \frac{B}{\lambda^2}$; A et B étant des constantes, λ la longueur d'onde considérée. Il s'ensuit que, si l'ouverture du diaphragme admettant l'énergie sur les soudures de la pile thermo-électrique est constante, la gamme de longueurs d'onde dont l'énergie tombe sur les soudures est d'autant plus grande que la longueur d'onde moyenne est plus élevée. Les valeurs obtenues étaient exactes, mais les corrections étant longues, on était obligé de limiter le nombre de lectures, et l'on n'explorait qu'imparfaitement le spectre.

Enregistrement automatique de la courbe d'énergie. — En 1944, je réalisai avec mon collaborateur M. GAMEL, un dispositif enregistreur utilisant les mêmes appareils sensibles, mais, afin d'avoir une sensibilité suffisante, je fus obligé de remplacer la pile thermo-électrique par une cellule photo-électrique à couche d'arrêt. Les mêmes corrections étaient à faire avec, en plus, celle de la sensibilité sélective de la cellule.

On pouvait comparer la courbe obtenue avec celle d'un enregistrement de l'énergie d'une lampe à filament de tungstène de température connue, et la corriger en conséquence, mais c'était fort long.

Il était très séduisant de faire effectuer les corrections par le dispositif enregistreur. Ce travail fut mené à bien par mes collaborateurs. L'appareil que je vais décrire a été réalisé presque entièrement par les moyens du Laboratoire. C'est à M. SONGIS, que revient la conception de la plupart des dispositifs de correction, aidé par M. GAMEL, lequel en assura la réalisation. M. BAROIN fit œuvre de physicien, et prit une part prépondérante à l'étalonnage et à la mise au point.

L'appareil (*fig. 25*) comporte trois dispositifs de correction :

— Le tiroir C, portant la lentille A, assure par son déplacement la correction de mise au point en fonction de la longueur d'onde.

— La came I assure une proportionnalité simple entre la longueur d'onde de l'énergie admise et le déplacement du papier photographique.

— Les comes L règlent l'ouverture d'entrée de la cellule photo-électrique de manière à effectuer globalement les corrections de transparence sélective des optiques, du resserrement prismatique du spectre, et de sensibilité sélective de la cellule.

Le fonctionnement est le suivant :

La lentille A concentre le flux émergeant de la fente B dans le plan d'une cellule photo-électrique à couche d'arrêt J type 3 002 de L. M. T. Cette lentille est mobile suivant son axe optique, et le tiroir C, sur lequel elle est fixée, se déplace automatiquement de façon à assurer la mise au point optimum pour toutes les longueurs d'onde. Son déplacement est lié à celui du chariot mobile D par l'intermédiaire de la rampe E.

Le prisme fixe F, placé entre la lentille et la cellule, réglé à la déviation minimum pour la raie verte du mercure, étale le spectre dans le plan de la cellule.

Le chariot mobile D, commandé par un moteur ou à la main, porte le papier sensible G contenu dans un châssis qui défile derrière la fente H.

Ce chariot commande le déplacement de la cellule par l'intermédiaire de la came I. La came transforme le mouvement de manière que la loi des déplacements relatifs d_1 de la cellule et d_2 du chariot, donc de la cellule et du papier sensible qui est porté par ce dernier, soit de la forme

$$d_1 = A + \frac{B}{d_2} \quad (A \text{ et } B \text{ étant des constantes}).$$

Les déplacements du papier sont ainsi rendus proportionnels à la longueur d'onde moyenne du rayonnement tombant sur la cellule.

La courbe obtenue a donc des abscisses en rapport simple avec les longueurs d'onde, comme celle du spectre dit normal, qu'on obtient avec un réseau. Pour ajuster la came I, on l'a découpée approximativement, et on ne l'a finie qu'après avoir tracé expérimentalement son profil d'après 24 raies caractéristiques.

Devant la cellule J se trouve une portière à ouverture variable. Le portique K repose sur les comes L par l'intermédiaire de galets, et sa position commande l'ouverture des volets M par l'intermédiaire des rampes en forme de V.

La loi d'ouverture de la portière doit tenir compte :

- 1° Des transparences sélectives de la lentille et du prisme;
- 2° Du resserrement prismatique;
- 3° De la sensibilité sélective de la cellule.

La réalisation des cames L a été faite en deux temps. Elles ont d'abord été découpées approximativement et trop grandes, puis on les a retouchées jusqu'à ce que l'enregistrement du flux d'une lampe à ruban de tungstène dont la température est connue soit conforme à la distribution énergétique théorique. La lampe dont nous nous sommes servis était un étalon Philips 2360° K. En appliquant la formule de PLANCK, et en corrigeant l'émission au moyen des Tables de FORSYTHE et WORTHING on pouvait déterminer la distribution spectrale de la lumière émise par le ruban. Il fallait donc que la courbe enregistrée fût conforme à cette distribution. La répétition de cette opération permet de s'assurer à volonté que l'appareil n'est pas dérégulé.

Le galvanomètre O relié à la cellule J projette son spot sur la fente H. Le déplacement de ce spot est rendu vertical par une combinaison de prismes. On a vérifié que ces déviations étaient proportionnelles au flux reçu par la cellule.

Il est indispensable de s'assurer que pendant le tirage, qui dure 4 mn 30 s, le flux lumineux reçu par la fente d'entrée n'a pas varié. Dans ce but, un petit miroir P dévie avant le prisme et dirige sur la cellule Q une fraction du flux passant par la fente B; le galvanomètre R, relié à cette cellule, envoie sur le papier sensible un spot dont l'élongation est proportionnelle au flux total.

On obtient donc sur le papier sensible deux courbes dont les ordonnées sont proportionnelles, l'une à l'énergie admise par la portière de la cellule J, l'autre à l'énergie totale émise par la source. Le rapport de ces ordonnées mesure donc, quelles que soient les fluctuations de la source, et à un facteur constant près, l'énergie transportée par la bande moyenne passante.

Il faut remarquer que l'intervalle de longueur d'onde $d\lambda$ admis sur la cellule n'est pas constant le long du spectre, et que la finesse d'analyse varie de façon concomitante.

L'exploration du spectre se réduit à peu près au spectre visible, car, si la sensibilité de la cellule s'étend assez loin dans l'ultraviolet, la transparence du verre est limitée à 3 800 Å environ. Dans le rouge, par contre, la sensibilité de la cellule est limitée à 7 200 Å environ. L'énergie enregistrée est donc comprise entre 4 000 Å et 7 200 Å, ce qui couvre suffisamment le domaine des radiations auxquelles l'œil est sensible.

Je mentionnerai encore quelques dispositifs accessoires. L'impression des longueurs d'onde tous les 200 Å a lieu par illumination automatique de la fente H. Un commutateur agissant sur le courant de la lampe spot du galvanomètre O permet quatre types d'inscription :

- trait continu;
- point;
- trait discontinu;
- trait-point;

on peut ainsi superposer quatre enregistrements. En bref, l'appareil peut être manipulé par un manœuvre intelligent.

Les photographies des figures 46, 47 et 48, montrent quelques enregistrements carac-

téristiques. La courbe supérieure de la figure 46-1, par exemple, correspond au galvanomètre O et à la cellule J, la courbe inférieure au galvanomètre R et à la cellule Q. Si cette dernière courbe était absolument parallèle à l'axe des longueurs d'onde, la courbe supérieure représenterait, à un facteur constant près, l'énergie spectrale en fonction de la longueur d'onde. Pour les mesures de précision, il faut effectuer, pour chaque longueur d'onde intéressante, le rapport des ordonnées des deux courbes.

Utilisation des résultats. — La comparaison des courbes de deux charbons d'arc permet de se faire une idée des différences de richesses dans tel domaine du spectre, par exemple, plus de rouge, plus de vert, ou mieux de trouver par la position des « vagues » l'élément cause d'un renforcement local de l'énergie. Il est souvent intéressant de corriger la courbe énergétique du coefficient de visibilité de l'œil moyen. On se rend ainsi mieux compte de l'importance des différences locales d'énergie. Cette correction est assez longue, aussi avons-nous envisagé de la faire effectuer par l'appareil, ce qui n'était pas beaucoup plus difficile, puisqu'il aurait suffi de tailler en conséquence les cames L. La courbe énergétique est d'application plus générale, en particulier elle permet de passer au système trichromatique international X, Y, Z. L'opération se fait de la façon suivante.

Étant donnée une longueur d'onde, on mesure les ordonnées des deux courbes, et l'on en fait le rapport qui exprime l'énergie absolue à une constante près. La valeur E trouvée est multipliée par les coefficients trichromatiques $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$, du système standard de la C. I. E., d'où les valeurs E_x , E_y , E_z .

On opère de même pour toutes les longueurs d'onde, d'où

$$\begin{array}{lll} \text{pour } \lambda_1 : & E_1 x & E_1 y & E_1 z \\ & E_2 x & E_2 y & E_2 z \\ & \dots\dots\dots & & \\ & E_n x & E_n y & E_n z \end{array}$$

En réalité, on fait les relevés d'énergie par tranches de longueurs d'onde. Nous avons jugé suffisant de prendre des tranches de 50 Å.

On fait ensuite la somme des valeurs par coefficient

$$\begin{array}{lll} E_1 x & E_1 y & E_1 z \\ E_2 x & E_2 y & E_2 z \\ \dots\dots\dots & & \\ E_n x & E_n y & E_n z \\ \hline \Sigma E_x & \Sigma E_y & \Sigma E_z \end{array}$$

Les coordonnées dans le triangle des couleurs (fig. 49) sont données par les rapports respectifs :

$$\begin{aligned} X &= \frac{\Sigma E_x}{\Sigma E_x + \Sigma E_y + \Sigma E_z}, \\ Y &= \frac{\Sigma E_y}{\Sigma E_x + \Sigma E_y + \Sigma E_z}, \\ Z &= \frac{\Sigma E_z}{\Sigma E_x + \Sigma E_y + \Sigma E_z}. \end{aligned}$$

La connaissance du point représentatif d'une source permet de la situer par rapport au rayonnement du corps noir, et les cinéastes ont fixé à $5\,300^{\circ}$ la température de couleur idéale pour la projection colorée. La comparaison de ce point avec ceux représentant la lumière blanche ou une lumière connue renseigne, en se basant sur les notions de dominante et de facteur de pureté, sur les sensations colorées qui en résulteront pour l'œil humain.



CHAPITRE III.

PHÉNOMÈNES CATHODIQUES.

Ainsi que je l'ai exposé, les phénomènes cathodiques sont indépendants de la haute brillance du cratère dans l'arc intensif. J'estime néanmoins que leur étude entre dans le cadre du présent travail.

I. — GÉNÉRALITÉS.

L'arc prend naissance sur une petite surface qui est portée à beaucoup plus haute température que le reste de la pointe de la cathode, et qu'on appelle tache cathodique. Les études faites sur les cathodes de charbon sont généralement relatives à de faibles intensités. Les chiffres rapportés par COMPTON [26] montrent que la densité de courant sur la tache cathodique peut varier énormément avec la pureté du charbon. Par exemple, pour la température de 3140° K, la densité de courant est 26,7 A : cm² pour du charbon très pur, et 4400 A : cm² pour du charbon imprégné de sels minéraux. Pour un arc assez long, dans des conditions qui semblent plus se rapprocher de la pratique de l'arc, SEELIGER [27] énonce que la densité de courant sur la tache cathodique est constante et se montre à environ 470 A : cm². De nombreuses déterminations de la température de cette tache ont été faites. Les valeurs publiées varient de 2903 à 3593° K, mais le chiffre le meilleur semble être, d'après COMPTON, celui de REICH, soit 3143° K [28]. En fait, d'après KOHN et GÜCKEL ⁽¹⁾, la température de la cathode peut atteindre celle de l'anode sans jamais la dépasser. Cette assertion a été confirmée par l'expérience des arcs à très haute intensité, pour lesquels des perturbations se produisent à la cathode lorsque la sublimation du carbone a lieu.

Il est bien établi que la tache cathodique émet en abondance des électrons. Le processus d'émission de la cathode d'un arc a fait l'objet de plusieurs théories et a donné lieu à de nombreuses controverses. J. J. THOMSON [2] et STARK ont, d'après COMPTON [26], admis les premiers que le processus était thermique. La cathode, portée à haute température, libère des électrons suivant la loi établie par RICHARDSON [30].

$$I = AT^2 e^{-\frac{B}{T}}.$$

⁽¹⁾ *Zeits. f. Physik.*, 27, 1924, p. 356.

Les constantes A et B ont les valeurs respectives de 1,49 et 48700 pour le carbone pur, 3,3 et 4200 pour le carbone imprégné de matières minérales [26].

La théorie thermionique a été très discutée. Comme elle suppose que la surface émissive est portée à haute température, elle semble mise en défaut dans le cas de métaux à bas points d'ébullition, dont le plus typique est le mercure, et dans les cas qui rentrent dans le cadre de mon travail, des arcs STOLT [31] et GARBARINI [7]. L'arc STOLT éclatait entre deux électrodes de charbon, mais la cathode était constituée par un disque tournant à grande vitesse. Quant à l'arc GARBARINI, il éclate entre une anode de charbon et une cathode en cuivre en forme d'anneau creux aplati, refroidi par de l'eau. Un champ magnétique cause une rotation rapide de l'arc, dont le point d'impact cathodique se déplace à une grande vitesse sur la surface de cuivre. La contradiction avec la théorie thermionique peut n'être qu'apparente, car il suffit que la température élevée règne sur une épaisseur très faible de la cathode; c'est ce qu'ont soutenu plusieurs auteurs.

LANGMUIR [33] a établi une théorie d'après laquelle les électrons seraient extraits à la cathode par la présence d'ions positifs se trouvant bloqués à ses abords immédiats par une couche de gaz, et causant par leur présence l'existence d'un champ électrique très intense (de l'ordre de 10^6 V : cm d'après BECKERS et SEELIGER) et très localisé. C'est la théorie du champ.

COMPTON [26] admet la validité des deux théories. Les calculs prouvent que l'émission thermionique peut rendre compte du passage du courant, mais que l'émission peut être plus élevée par suite du choc d'ions positifs dus à la haute température locale. Il estime que l'émission thermionique peut être complétée par l'extraction d'électrons sous l'action du champ.

SLEPIAN [34] admet l'émission thermionique, et reprend les théories de COMPTON relatives à la colonne positive pour établir que l'arc est le siège d'une ionisation thermique. Je mentionne pour mémoire l'hypothèse d'une émission photoélectrique dont l'importance serait secondaire.

En ce qui concerne l'entretien de la haute température de la cathode, on admet qu'elle serait due à la chaleur abandonnée par les ions positifs qui arrivent sur elle. Les ions positifs provenant de la colonne créeraient une charge spatiale responsable de la chute cathodique, dans la région de laquelle d'autres ions seraient produits par ionisation cumulative (COBINE [82], p. 302 et 303).

Je n'ai pas le moyen de trancher la question d'un point de vue général. Les études auxquelles je me suis référé sont relatives à des arcs de quelques dizaines d'ampères. Si l'on considère le cas des arcs au charbon de plus de 80 A sur lequel je reviendrai [36], il paraît bien établi par les travaux de FINKELBURG [35] et ROHLOFF [36] qu'un jet d'électrons de plusieurs centimètres jaillit de la cathode. Il me semble que, tout au moins pour ces arcs à haute intensité, l'émission thermionique de la cathode chaude ne fasse aucun doute.

II. — DESCRIPTION DES PHÉNOMÈNES.

Les environs immédiats de la cathode sont le siège de la chute cathodique. J'ai mentionné à propos de l'arc classique les chiffres de M^{me} AYRTON [14], 8 à 9 V, de MASON [15] environ 10 V, relatifs à des arcs de faible puissance. HEATLEY et SOANES [37] ont déduit

de leurs expériences sur un arc non minéralisé de 300 A de la chute cathodique de 14 V avec un gradient de 1 V : mm dans la colonne. ENGEL et STEENBECK admettent d'après LÖEB [38] (p. 612) le chiffre de 15,8 V. PRESTON R. BASSETT [19], opérant sur un arc intensif de 150 A/75 V, a trouvé à l'aide d'une sonde en carbone la valeur de 9 V. Pour SEELIGER [27] (p. 283) la chute cathodique est fonction de l'intensité, et peut être exprimée par la formule $V = 7,6 + \frac{13,6}{I}$ (V en volts, I en ampères). Les valeurs données par cette formule sont comparables à celles de M^{me} AYRTON.

La profondeur de la zone de chute cathodique a été estimée par COMPTON égale au libre parcours moyen des électrons, en supposant qu'il existe une charge spatiale causée autour de la cathode par les ions affluents. D'après la théorie de LANGMUIR, cette zone serait inférieure au libre parcours, il s'agit en tous cas d'un ordre de grandeur inaccessible aux mesures directes.

Aux intensités de quelques dizaines d'ampères, l'aspect de l'arc des abords de l'anode



Fig. 26.

à la cathode est homogène et de couleur violette. Si l'on élève progressivement l'intensité, l'arc ne change pas sensiblement d'aspect, on constate seulement que si son volume augmente, ses contours deviennent moins divergents et qu'il devient plus rigide. A 80 A l'aspect change. La presque totalité de l'arc, en partant de la cathode, se contracte, et il apparaît au centre une zone que nous appelons dard, lequel semble jaillir, tel un jet de liquide, de la pointe du charbon cathodique en direction du cratère (voir fig. 6, photo 7, planche). En même temps qu'il se pince, l'arc devient plus conducteur (par exemple pour une longueur d'arc de 34 mm, les caractéristiques passent brusquement de 60 V/75 A à 65 V/95 A) et plus rigide, ce dont on s'aperçoit par sa plus grande résistance aux courants d'air.

Le dard semble séparé du plasma qui l'entoure par une zone sombre très ténue. Les contours se précisent au fur et à mesure que l'intensité croît. Trois zones concentriques enveloppent le dard : la première, sombre de teinte orange, la seconde d'un beau violet, et la troisième, mince et en contact avec l'air, de teinte rougeâtre. C'est seulement au-dessus de 100 A, et particulièrement à partir de 130 A, que ces zones apparaissent très nettement, mais elles existent dès l'origine du phénomène. Le diamètre de la veine cathodique double environ de 90 à 150 A, puis change peu. Son aspect reste le même jusqu'à 900 A, puis, il apparaît dans le centre, une veine brillante d'un blanc bleuté que GUILLERY et ZILL [88] ont observée entre 900 et 1 000 A.

Les travaux les plus intéressants qui ont été faits sur la flamme cathodique sont de

FINKELNBURG et SCHLUGE [35] et de ROHLOFF [36]. Ils établissent que le dard est un flux d'électrons qui transportent la totalité du courant. Leur vitesse est, d'après ROHLOFF [36], de l'ordre de 10^8 cm : s . Il a calculé cette valeur d'une part, à partir de l'énergie cinétique du dard mesurée expérimentalement, d'autre part, à partir de mesures faites dans un champ magnétique. L'ensemble des vapeurs se déplace à une vitesse de 30 m : s , mesurée avec un appareil à lentilles multiples (Zeitlupenapparatur). L'impulsion serait liée à l'existence de la chute cathodique. La température du dard doit être très élevée, HÖCKER et FINKELNBURG l'ont estimée par le calcul à environ $11\,000^\circ \text{ K}$ [32]. Le dard a un spectre continu de l'infrarouge à l'ultraviolet, qui contient seulement les raies très élargies des atomes de C, O, N. Vu la haute température, les atomes s'y trouvent très raréfiés, mais il y a une forte densité d'électrons, puisque la densité de courant y est de l'ordre de $3\,000 \text{ A : cm}^2$ [35]. FINKELNBURG croit que le spectre continu est un spectre de freinage des électrons dans le champ des ions, suivant les idées qu'il a développées [39], l'élargissement des raies étant provoqué par des chocs d'électrons dus à la forte densité de ces derniers.

Le plasma qui enveloppe le dard est à température moins élevée, sauf aux environs immédiats de ce dernier, où FINKELNBURG et SCHLUGE ont relevé des raies des atomes ionisés de calcium et de baryum; dans le reste de l'enveloppe, ces auteurs ne signalent que des raies des atomes excités et les bandes intenses des molécules C_2 et CN . On ne trouve pas dans la partie cathodique des raies appartenant aux éléments contenus dans l'anode, alors qu'aux intensités inférieures à 80 A , lorsque le dard n'existe pas, le spectre de ces éléments se manifeste dans l'ensemble de l'arc. Lorsque le dard est formé, les parties cathodiques et anodiques de l'arc sont bien séparées, ce qui conduit souvent à parler de flamme négative et de flamme positive semblant lutter entre elles.

Il semble que l'aspect particulier de la partie cathodique de la décharge au delà de 80 A soit dû à un effet de pincement sous l'action du champ magnétique propre, suivant les vues de TONKS [40]. Le seuil de l'apparition du dard, situé à 80 A , à 2 ou 3 A près, pour un arc brûlant librement dans l'air, ne semble influencé ni par la matière du charbon négatif, ni par la densité de courant. J'ai fait par hasard une observation qui m'a conduit à chercher à provoquer artificiellement la formation du dard à des intensités inférieures à 80 A .

III. — ÉTABLISSEMENT ARTIFICIEL DU DARD.

C'est en soufflant du gaz carbonique ou de l'air par le canal de mèche vide du charbon négatif dans un arc de 40 A , que je vis apparaître un petit dard. Je fis la même observation en soufflant le gaz du charbon positif vers le charbon négatif, ou en créant une dépression dans le trou de mèche vide du charbon négatif. Le phénomène devint beaucoup plus net et plus facilement reproductible lorsque j'eus muni ce dernier d'une buse concentrique, et que je soufflai le gaz à la périphérie de l'arc dans le sens négatif-positif. Les photographies 27 montrent qu'à $40\text{-}45 \text{ A}$, suivant l'intensité du soufflage, on peut faire apparaître à volonté le dard avec ses gaines peu nettes ou très nettes, et que son aspect est tout à fait le même que celui qu'on observe à 80 ou à 110 A . Les hypothèses que j'ai faites sur un effet de refroidissement qui augmenterait le gradient de température entre le centre et la périphérie de la décharge, ou un effet de compression de la veine, ou encore un effet d'entraînement des vapeurs, ne me semblent pas

satisfaisantes, et je me borne à signaler le fait en espérant qu'il pourra contribuer à l'établissement de la théorie de l'arc.

Cette observation paraît sans intérêt dans la pratique de l'arc lumineux, car lorsqu'on augmente la pression sur les vapeurs anodiques, on diminue le rendement lumineux. Lorsque le dard apparaît, il constitue une gêne, et il est difficile d'obtenir un arc stable entre deux charbons horizontaux aux environs de 80 A. Il est alors indiqué d'incliner le charbon négatif par rapport au charbon positif, et l'existence du dard devient alors un avantage à cause de la rigidité qu'il confère à l'arc. La contraction provoquée de la veine cathodique peut présenter un intérêt dans la soudure à l'arc.

IV. — DONNÉES PRATIQUES.

Si les phénomènes cathodiques sont les plus intéressants pour les physiciens, ce sont les phénomènes anodiques qui sont prépondérants pour les techniciens de l'arc, lesquels demandent seulement au charbon négatif de fixer le point de départ de l'arc, car tout déplacement de ce dernier a des répercussions sur les phénomènes anodiques.

Pour fixer l'arc, on munit habituellement le charbon négatif d'une mèche placée dans un canal dont le diamètre, qui peut varier de 1,5 à 3 mm, n'est en rapport étroit ni avec le diamètre du charbon, ni avec l'intensité. La mèche, qui comporte des matières facilement ionisables, peut par exemple contenir 10 à 20 % de silicates, borates, fluorures de métaux alcalins. LANGMUIR [33] a fait ressortir combien les coefficients de la formule de RICHARDSON sont différents pour le carbone pur et pour le carbone imprégné de sels minéraux. Il faut en somme que les sels minéraux de la mèche alimentent l'arc, afin que ce dernier n'ait tendance ni à se déplacer, ni à se rompre. La volatilité des sels doit être assez basse pour que la mèche ne s'épuise pas trop profondément. Le rôle de l'écorce n'est pas négligeable, si elle est trop conductrice de la chaleur, la tache cathodique ne se maintient pas suffisamment chaude et se déplace.

La réalisation d'un bon charbon négatif présente peu de difficultés jusqu'à 250 A. Il arrive déjà à cette intensité que lorsqu'on rallume l'arc, sa partie cathodique soit perturbée pendant quelques secondes. Elle est alors trouble, bruyante, en forme de gerbe ouverte, la tension d'arc est abaissée, et il n'y a pas de dard. Nous admettons alors que l'émission électronique est insuffisante, à cause de la température trop basse du charbon négatif, et d'une vaporisation insuffisante des matières minérales, les deux effets étant liés. Lorsque le charbon est neuf, l'équilibre de température est aussi long à atteindre, mais la surface de la pâte à mèche est alors riche en matières minérales qui se vaporisent immédiatement et concourent à l'émission électronique. Pour les intensités de 450 A, le brouillage de la partie cathodique se produisait en cours de fonctionnement, et il fallut adopter une mèche plus compacte et plus minéralisée. A 650 A, la question est encore plus difficile à résoudre, et à 1000 A, les Allemands ont dû, dans les projecteurs mis au point pendant la dernière guerre, renouveler constamment la surface d'émission cathodique en faisant tourner sur lui-même un gros charbon homogène [41] et en maintenant la veine cathodique sur le bord du charbon au moyen d'un soufflage magnétique.

On connaît des projecteurs munis de deux charbons négatifs montés en parallèle. Des constructeurs anglais viennent encore d'en réaliser un, pour usage de studio, dans le

but de diminuer le bruit. Le bruit émis par le jet cathodique augmenterait avec l'intensité, et l'on diminue ainsi l'intensité dans chaque charbon négatif. Ces derniers sont placés à 100° l'un de l'autre dans un plan incliné de 30° par rapport au charbon positif. La tension d'arc est abaissée par cet artifice de 65 à 48 V pour une intensité totale de 150 A [42].

V. — PERTURBATIONS DUES A LA PARTIE ANODIQUE DE L'ARC.

Aux intensités supérieures à 80 A, le jet cathodique semble exercer, toute influence électrique mise de côté, une pression sur la masse de vapeur sortant du cratère. Les figures et reproductions 6, 7, 27 mettent ce phénomène en évidence. Les vapeurs émanant du cratère doivent, sous l'action de la pesanteur et du jet cathodique, s'élever et ne pas se mélanger au jet cathodique. Les positions relatives du dard et de la flamme sont à régler, ainsi que je l'ai exposé à propos de l'arc intensif 150 A, pour que les choses se passent ainsi. Si l'impact est trop haut, il peut arriver que les vapeurs anodiques se glissent le long du dard et en dessous, et atteignent la pointe du charbon négatif sur laquelle des carbures se condensent.

Lorsqu'on a affaire à des charbons brûlant en position horizontale avec une longueur d'arc de 6 mm et à des intensités de 30 à 75 A, ce phénomène se produit beaucoup plus facilement. J'ai pu voir les vapeurs sortant du cratère se diriger vers la cathode par la partie inférieure de l'arc, mais, d'après des observations au spectroscope, les terres rares sont normalement présentes dans l'arc tout entier. Quoi qu'il en soit, le dépôt de carbures métalliques est quelquefois très abondant, et se présente sous forme d'une grosse goutte qui bouillonne, perturbe l'arc, et empêche le rallumage à cause de ses propriétés isolantes.

Ce phénomène a été très étudié. Il est combattu par une diminution du taux de la minéralisation du charbon positif, l'allongement de l'arc, la conductibilité thermique faible de l'écorce constituant le charbon négatif, l'augmentation de la densité de courant dans ce dernier, l'accroissement du taux de matières minérales dans la mèche. Je l'ai supprimé en introduisant un fluorure dans la mèche du charbon négatif. En effet, dans les vapeurs émanant de l'anode, il règne un équilibre entre les fluorures métalliques, le fluor, et les métaux provenant de la dissociation, le carbone et les carbures métalliques. Les carbures tendent à se déposer au contact du charbon négatif parce qu'ils sont relativement peu volatils et que la forte concentration en cérium déplace l'équilibre : $Ce + 2 C = C_2Ce$ de gauche à droite. Pour s'y opposer, il faut diminuer la concentration en atomes de cérium. Or, si l'on diminue le taux des métaux rares introduits dans l'anode, on modifie le rendement lumineux, mais on peut aussi diminuer la concentration des atomes métalliques en agissant sur l'équilibre $Ce + 3 F = F_3Ce$ par augmentation de la concentration en atomes de fluor dans la mèche cathodique. Le résultat a été pleinement satisfaisant [43].

VI. — INFLUENCES EXTÉRIEURES.

1° *D'origine hydrodynamique.* — Dans l'air calme, les vapeurs de l'arc ont tendance à s'élever par suite de leur température. Lorsque le dard n'existe pas, l'arc est assez sensible à cette influence, et d'autant plus qu'il est plus long. Lorsque le dard existe, la

rigidité de l'arc est suffisante pour permettre sans inconvénient le basculement de la lampe dans le plan des charbons, ainsi qu'on le fait pour pointer un projecteur au zénith. Il existe même des projecteurs dans lesquels les charbons, inclinés l'un par rapport à l'autre, sont contenus dans un plan horizontal ou même dans un plan incliné de façon que le charbon cathodique soit plongeant (*fig. 26*). Le projecteur allemand de 1000 A a son charbon négatif placé verticalement, de haut en bas, par rapport au charbon positif.

2° *D'origine magnétique.* — La partie cathodique de l'arc, particulièrement de l'arc avec dard, est très sensible aux influences magnétiques, puisque ce dernier est un flux d'électrons. M. PERRIN a constaté que le dard se brouillait sous l'influence d'un champ magnétique alternatif. ROHLOFF [36] en soumettant le dard à un champ magnétique longitudinal, a obtenu sa rotation sur lui-même et son enroulement en hélice. Se basant sur le pas de l'hélice et la valeur du champ, il en a déduit la vitesse des électrons, et a trouvé par ce moyen la même valeur de 10^8 cm : s qu'en partant de l'impulsion du dard.

On peut agir par voie magnétique sur l'arc pour s'opposer à sa montée sous l'action de la température, favoriser ou non l'effet BECK, redresser la flamme, ou simplement stabiliser l'arc en paralysant ses déplacements. Beaucoup de lampes sont munies d'un soufflage magnétique dont les lignes de force sont sensiblement en croix avec les lignes de courant. Le champ est obtenu soit à l'aide d'un aimant permanent, soit à l'aide d'un électro-aimant dont les spires sont généralement en série dans le circuit.

La forme du parcours que le courant emprunte pour parvenir aux charbons n'est pas à négliger, car le champ magnétique engendré peut agir sur l'arc. Enfin, la présence de masses de fer dans le voisinage de l'arc a également une action. On peut, par exemple, attirer l'arc vers le bas au moyen d'une tige de fer dressée dessous ou d'une pièce de fer en forme de demi-circonférence. Les constructeurs de lampes doivent tenir compte de toutes ces influences.

CHAPITRE IV.

PHÉNOMÈNES ANODIQUES.

I. — GÉNÉRALITÉS.

C'est l'Allemand BECK qui découvrit l'arc intensif. Le Brevet KÆRTING et MATHIESEN 262.913, demandé le 13 septembre 1910, délivré le 25 juillet 1913, mettait surtout en relief la possibilité d'augmenter la densité de courant dans une anode en charbon. D'après ce brevet, si pour une intensité électrique I on employait alors un charbon de diamètre D dont le diamètre de cratère était d ($d = 0,344 \sqrt{DI}$ d'après REY), le procédé BECK permettait d'utiliser un charbon d'un diamètre inférieur à d . L'intérêt réel des procédés BECK résidait surtout dans le fait qu'en surchargeant des charbons fortement minéralisés avec des sels de cérium, on pouvait obtenir des valeurs de brillance du cratère bien supérieures à celles du charbon non minéralisé fonctionnant en régime stable.

Le fait d'introduire des sels de terres rares, par exemple du fluorure de terres cériques, dans la mèche d'un charbon servant d'anode, augmente la conductibilité de l'arc. Ce dernier devient plus éclairant, plus volumineux, et son spectre révèle les raies d'arc des minéraux introduits. Le cratère est peu profond. L'intensité lumineuse qu'il émet est, à densité de courant égale, plus basse que celle d'un cratère de charbon non minéralisé, et la brillance de la mèche y est inférieure à celle de l'écorce. La caractéristique tension-intensité de l'arc est fortement descendante. Si l'on augmente l'intensité, cette caractéristique passe par un minimum, puis se relève, et devient ascendante (*fig. 39*). Un peu au-dessus du minimum de la caractéristique, les phénomènes suivants apparaissent brusquement : des vapeurs brillantes jaillissent du cratère, la tension augmente de 5 à 10 V, l'intensité baisse dans une mesure qui dépend des caractéristiques du circuit, le cratère se creuse, la brillance de la mèche augmente brusquement et devient supérieure à celle de l'écorce. Ces phénomènes constituent l'effet BECK. Par exemple, pour un certain charbon de diamètre 9 mm les caractéristiques passent de 66 A, 24 V, 20 000 sb, à 63 A, 34 V, 55 000 sb. La puissance dépensée varie donc dans le rapport 1,39, tandis que la brillance varie dans le rapport 2,36. Ce régime à haut rendement est la conséquence de l'effet BECK.

Ces phénomènes peuvent disparaître aussi brusquement qu'ils sont apparus, puis reparaitre sans cause extérieure apparente. Un raccourcissement de la longueur d'arc, un léger changement des positions relatives des charbons peuvent provoquer leur réapparition, mais c'est surtout l'augmentation de l'intensité qui les établira de façon

stable, une fois franchie la zone instable de la caractéristique. On peut alors faire les constations suivantes :

1° La densité de courant est au moins deux fois et demie celle du charbon non miné-

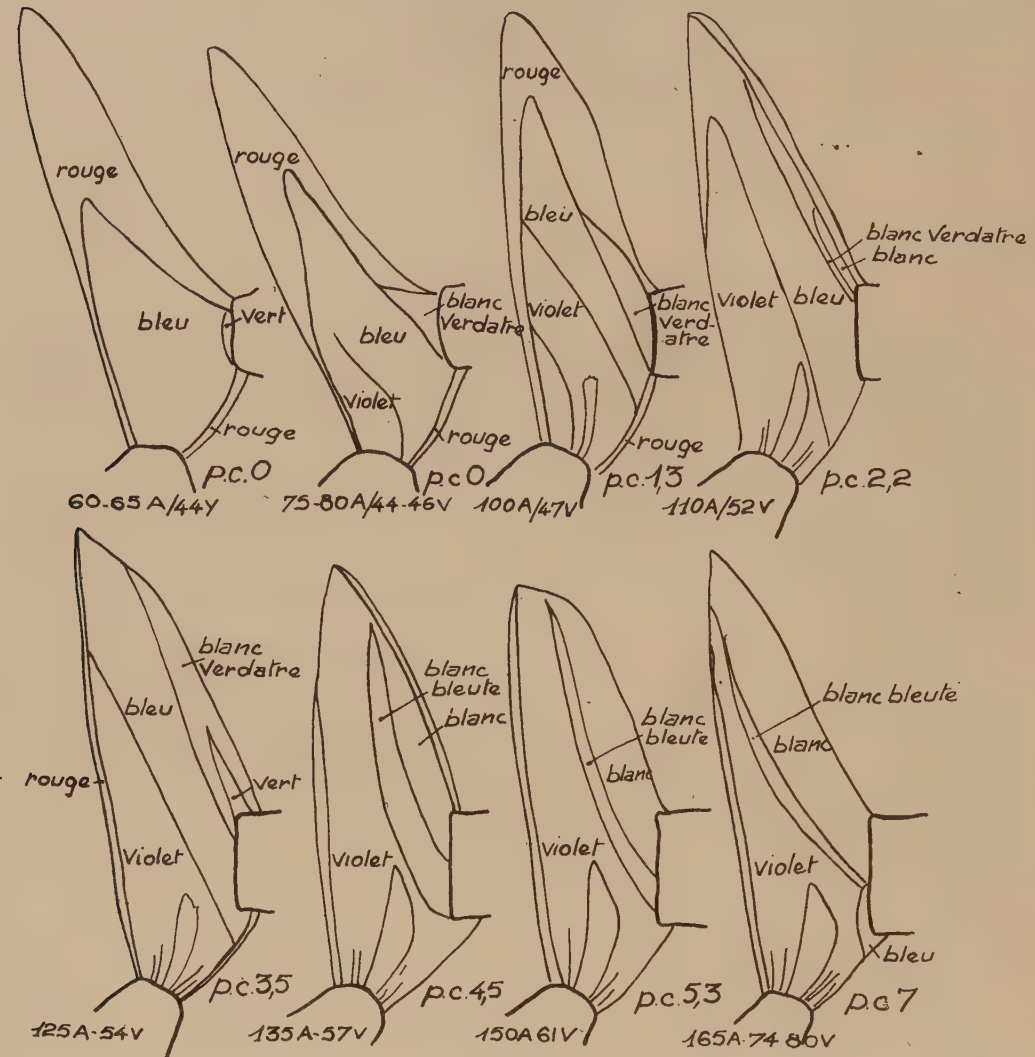


Fig. 28.

+ 553 Φ 13,6 mm; — 557 Φ 11 mm.

La profondeur du cratère (p.c.) est donnée en millimètres.

ralisé brûlant en régime stable. FINKELNBURG et SCHLUGE [44] notent que l'intensité peut alors s'exprimer en ampères par cinq fois le chiffre du diamètre en millimètres. L'arc est stable et silencieux.

- 2° Le cratère est creux, il s'en échappe une flamme plus brillante que le reste de l'arc
 3° La brillance maximum de la mèche est supérieure à celle de l'écorce, et dépasse largement les 18 000 sb qu'on trouve comme limite avec les charbons non minéralisés brûlant de façon stable. Elle est généralement d'au moins 50 000 sb.
 4° La caractéristique intensité/tension est fortement ascendante.

L'existence simultanée de ces phénomènes caractérise l'effet BECK. La figure 28 montre, d'après des croquis relevés par M. MATHIEU, la modification de l'arc en fonction de l'intensité.

Lors de l'établissement de l'effet BECK, les oscillations de l'intensité et de la tension se produisent en sens inverse de ce qu'indique l'allure de la caractéristique. Même lorsqu'on est en régime BECK établi, il arrive qu'une discontinuité, analogue à celle qui marque l'apparition de ce régime, apparaisse lorsqu'on accroît l'intensité : momentanément la tension augmente, tandis que l'intensité diminue, alors que d'après l'allure de la caractéristique, ces deux grandeurs devraient varier dans le même sens. La caractéristique instantanée est donc différente de celle déterminée en régime stable. BLONDEL avait fait une remarque analogue à propos de certains arcs.

Je vais maintenant étudier les différents facteurs qui influencent l'effet BECK.

TABLEAU 29.

Appairage.	Conditions.	Intensité (A).	Tension (V).	Longueur d'arc (mm).	Usure horaire (mm).	Brillance maximum (sb).	Cratère (mm).	
							Φ	Prof.
Positif Φ 9. Qualité 530	Charbon positif	65	65	19	234	51 000	6	1,5
	horizontal	75	65	16	321	69 500	6,5	2,5
	tournant	85	65	16	462	85 500	7,5	4
Négatif Φ 8. Qualité 533 cuivrée	Charbon négatif	95	65	13	708	105 000	8	5
	incliné de 45°,	100	67	12	810	118 500	8	5,3
	impact 0	110	73	13	1107	142 500	8,5	7,5
Positif Φ 13,6. Qualité 530	Charbon positif	115	60	18,2	150	46 500	10,5	2,5
	horizontal	125	64	18	180	60 000	11	3,5
	tournant	140	68	19	273	85 500	11	4,5
Négatif Φ 11. Qualité 533 cuivrée	Charbon négatif	150	73	19	393	95 000	12	—
	incliné de 45°, impact — 3,6							
Positif Φ 16. Qualité 591-06	Charbon positif	150	75	39	126	59 000	13	2,7
	horizontal	160	76	37	154	63 500	13	4,7
	tournant	170	77	34	194	69 500	13,7	5,5
Négatif Φ 11. Qualité 533 cuivrée	Charbon négatif	180	78	31	234	82 500	13,7	6,5
	incliné de 30°,	190	79	31	296	92 500	14	8
	impact + 2,4	200	80	31	363	114 000	15	8,5

II. — INFLUENCES EXTÉRIEURES AUX CHARBONS. INTENSITÉ DU COURANT.

Le tableau 29, les figures 29-1 à 29-4 et 15 montrent clairement que la tension, la brillance, le diamètre et la profondeur du cratère, l'usure, croissent avec l'intensité.

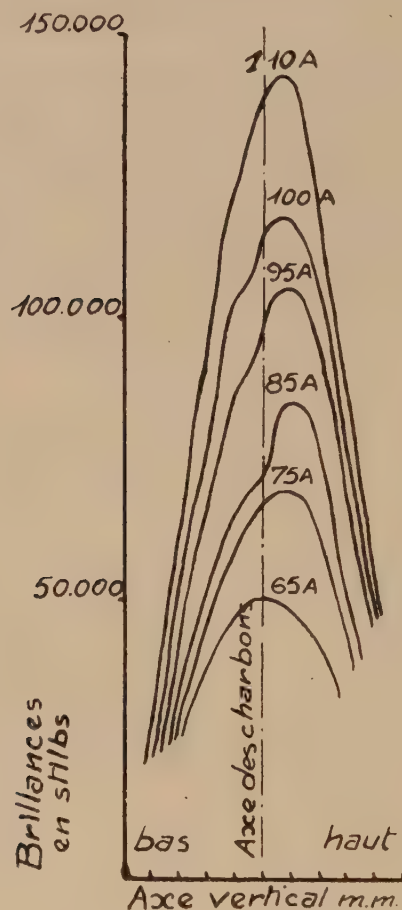


Fig. 29-1. — Répartition de la brillance sur l'axe vertical.

Charbons Orlux : + 550 Φ 9 mm tournant; — 555 Φ 8 mm cuivré.

Angle 45°. Impact o.

On est limité dans cette voie par les instabilités de l'arc et de la lumière qui deviennent prohibitives. Les vapeurs émises par le cratère deviennent bourdonnantes et libèrent du noir de fumée. Nous avons atteint 142 000 sb, PHERSON [52] indique 120 000 sb comme limite commerciale atteinte et dit qu'on a atteint 200 000 avec des anodes expé-

rimentales. L'arc de 1000 A réalisé en Allemagne pendant la guerre atteindrait

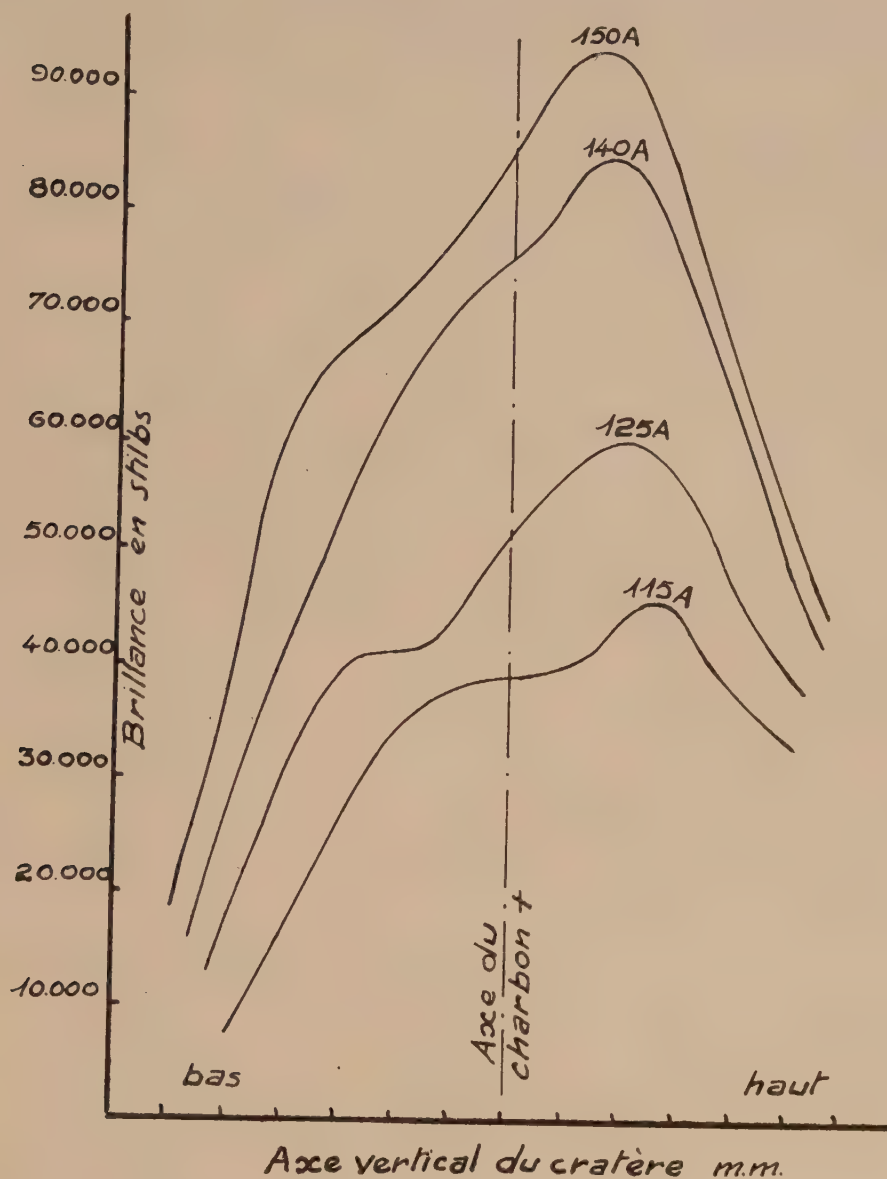


Fig. 29-2. — Répartition de la brillance sur l'axe vertical.

Charbons Orlux : 550 Φ 13,6 mm tournant; — 555 Φ 11 mm cuivré.

Angle 45°. Impact — 3,6.

1 600 bougies HEFNER par millimètre carré, soit 144 000 sb [41], BASSETT [19] dès 1923 mentionnait une brillance de 140 000 sb.

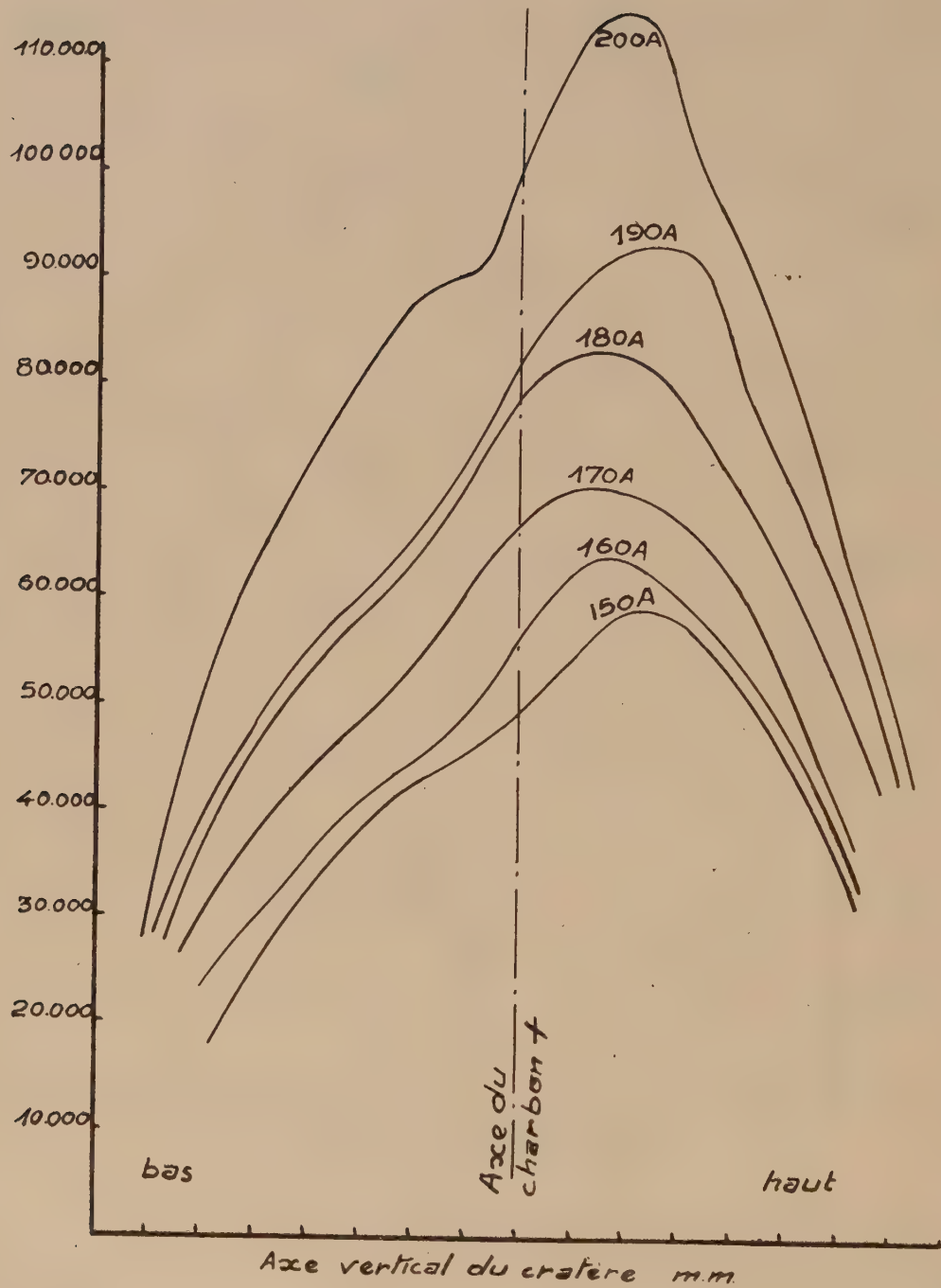


Fig. 29-3. — Répartition de la brillance sur l'axe vertical.
Charbons Orlux : + 591-06 Φ 16 mm tournant; — 555 Φ 11 mm cuivré.
Angle 30°. Impact + 2,4.

Positions relatives des charbons. — Cette question a été ébauchée à propos de de l'arc de 150 A.

a. Angle entre les charbons. — Aux régimes où le dard existe, c'est-à-dire au-dessus

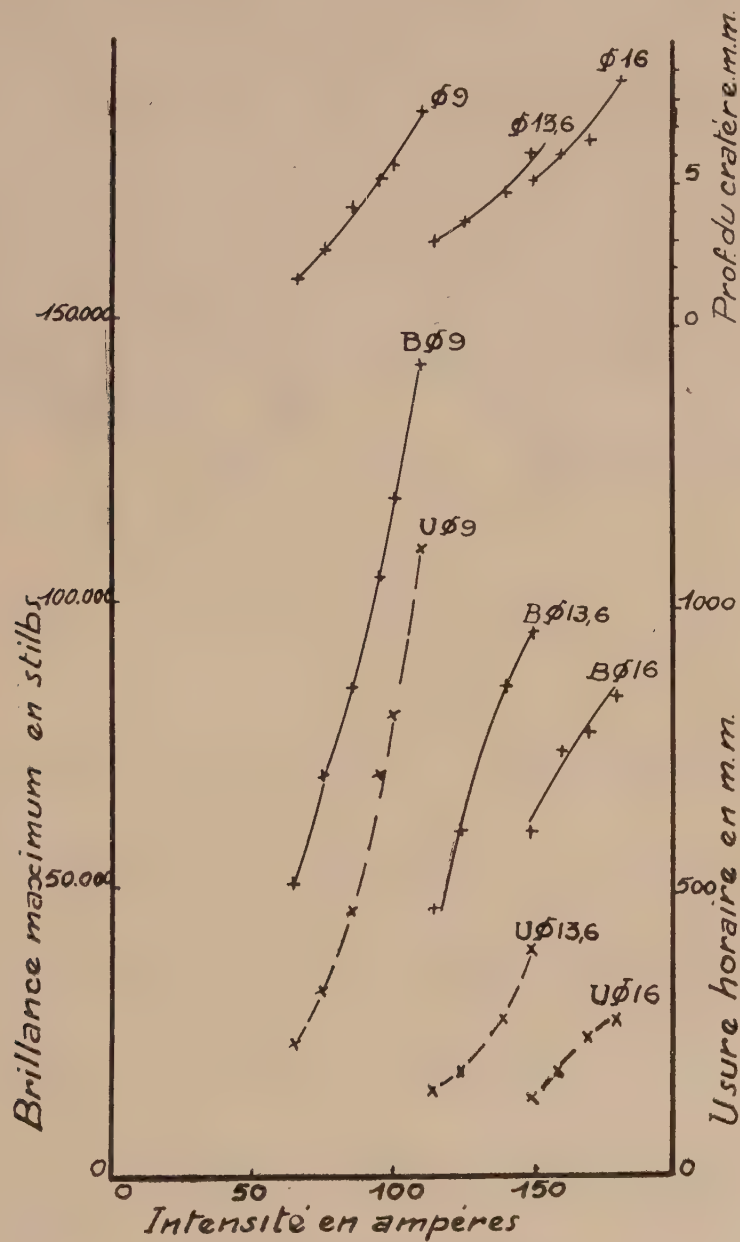


Fig. 29-4. — Influence de l'intensité.
Charbons + mèche dure $\Phi 0,5$ D (Orlux 550).

de 80 A, on incline généralement le charbon cathodique par rapport au charbon anodique pour éviter que le dard ne trouble le jet de vapeurs émis par l'anode ou vice versa. Ayant choisi un angle d'inclinaison, on peut agir sur la longueur d'arc, l'impact, la ventilation, de manière à obtenir un maximum de brillance qui diffère peu suivant la valeur de l'angle. Il semble cependant avantageux de faire croître l'angle avec l'intensité. D'après l'expérience, 15 à 30° conviendraient jusque vers 175 A et 45° au-dessus.

b. Impact. — L'impact est défini de la façon suivante. Si l'on prolonge l'axe du charbon cathodique, il rencontre le plan de la tranche du charbon anodique en un point.

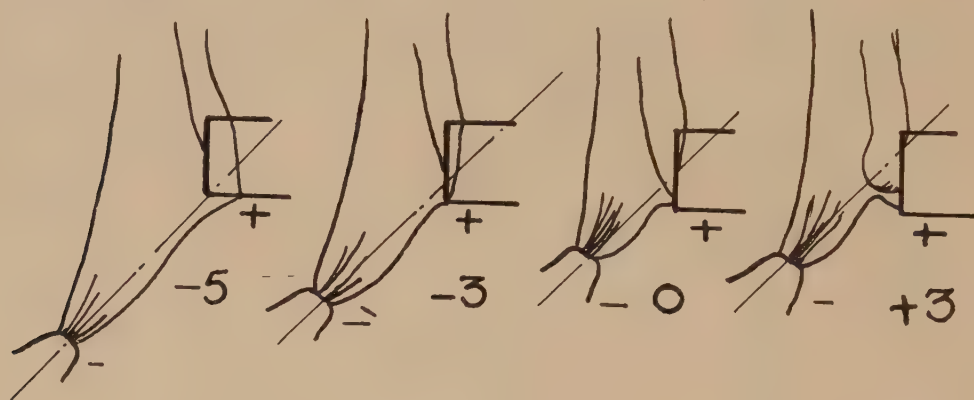


Fig. 30. — Influence de l'impact.

Charbons Orlux : + 552 Φ 13,6 mm tournant; — 555 Φ 11 mm cuivré.

Régime 125 A/75 V.

Impact.....	—5	—3	0	+ 3
Longueur d'arc.....	31	26	14	—
Brillances relatives.....	100	131	148	instable

C'est la distance de ce point au centre de la tranche qui est appelée impact; on la compte positivement en s'éloignant du charbon cathodique, et négativement en s'en rapprochant (*fig. 8*).

Comme en fait, c'est plutôt la position réelle du dard par rapport au cratère qui importe, et que le dard est incurvé, M. PERRIN a proposé l'emploi de paramètres x_1 , x_2 , y (*fig. 8*) qui serait plus précis, mais les documents en ma possession sont notés en impacts.

Lorsque l'impact est bas, la flamme entourant le dard vient lécher l'extrémité inférieure de l'écorce. Il s'ensuit une dérivation parasite d'énergie qui se traduit par une diminution du volume de la flamme blanche positive, une diminution de la résistance de l'arc, et une baisse de la brillance du cratère.

A tension d'alimentation constante, l'intensité électrique croît, la tension décroît, et la brillance du cratère baisse. Au fur et à mesure que l'impact remonte, l'amorçage parasite diminue, puis cesse, la flamme blanche augmente de volume, la résistance d'arc croît, ainsi que la brillance. A partir d'une certaine valeur, la flamme blanche

devient bourdonnante et instable, et la lumière devient inutilisable. Il existe donc un point d'impact optimum. Les figures 9 et 30 montrent l'allure du phénomène. Ainsi que l'a montré M. SUQUET, l'étude expérimentale permet de délimiter avec précision les zones dans lesquelles les extrémités des deux charbons d'arc peuvent être déplacées pour conserver un fonctionnement stable.

J'ai passé rapidement sur l'influence de l'angle.

En faisant varier l'impact, on peut pour n'importe quel angle compris entre 15° et au moins 45°, peut-être même 90°, obtenir une brillance égale.

c. Longueur d'arc. — C'est un facteur secondaire qui peut varier dans d'assez larges limites. Plus l'arc est court, plus le cratère se trouve occulté, mais la limite inférieure est donnée par l'apparition d'une condensation de carbure de terres rares sur la cathode aux bas régimes, et par une gêne mutuelle des vapeurs anodiques et cathodiques aux régimes plus élevés. La limite supérieure est donnée par une trop grande sensibilité aux courants d'air, un amorçage exagéré de l'arc sur les parois du charbon positif par suite de la divergence des filets de la partie cathodique de l'arc, et une dépense inutile d'énergie dans la colonne.

Voici quelques chiffres usuels :

	A.	Longueur d'arc (mm).
Charbons horizontaux.....	30 à 75	6
Charbons en angle.....	75	15 à 20
»	120	15 25
»	150	20 35
»	200	30 45
»	300	40 50
»	450	70 85

Influences hydrodynamiques. — Dans l'air calme les vapeurs de l'arc ont tendance à s'élever par suite de leur température. Ce mouvement ascendant ne peut avoir d'influence fâcheuse que sur la partie cathodique de l'arc.

Les projecteurs sont souvent ventilés artificiellement et la flamme surplombant l'arc est aspirée dans une cheminée. Le but n'est pas seulement de refroidir le projecteur mais aussi de masquer la flamme qui cause un rayonnement parasite dans le bas du faisceau. La disposition des charbons dans le plan horizontal ou dans un plan incliné n'a pas d'autre but. Enfin, un projecteur devant pouvoir être pointé suivant un site quelconque doit avoir son arc affranchi de la pesanteur.

Dans le projecteur SPERRY, le porte-charbon positif est refroidi par un violent courant d'air qui frappe la flamme au-dessus du charbon positif, et la souffle vers l'avant. Enfin, on peut couper cette flamme au-dessus du charbon par un fort courant d'air presque horizontal.

Tous ces dispositifs de soufflage ne sont pas sans agir sur le rendement lumineux. On peut considérer que leur influence directe sur la température du cratère est nulle, mais nous verrons que toute cause qui tend à faire sortir les gaz incandescents du cratère augmente la brillance de ce dernier. La figure 31 montre l'effet du soufflage dans les conditions analogues à celles du brevet français 789 761. La brillance maximum pour

une même dépense d'énergie passe de 52 000 à 70 000 sb et la brillance moyenne est encore plus augmentée. La consommation anodique est fortement accrue.

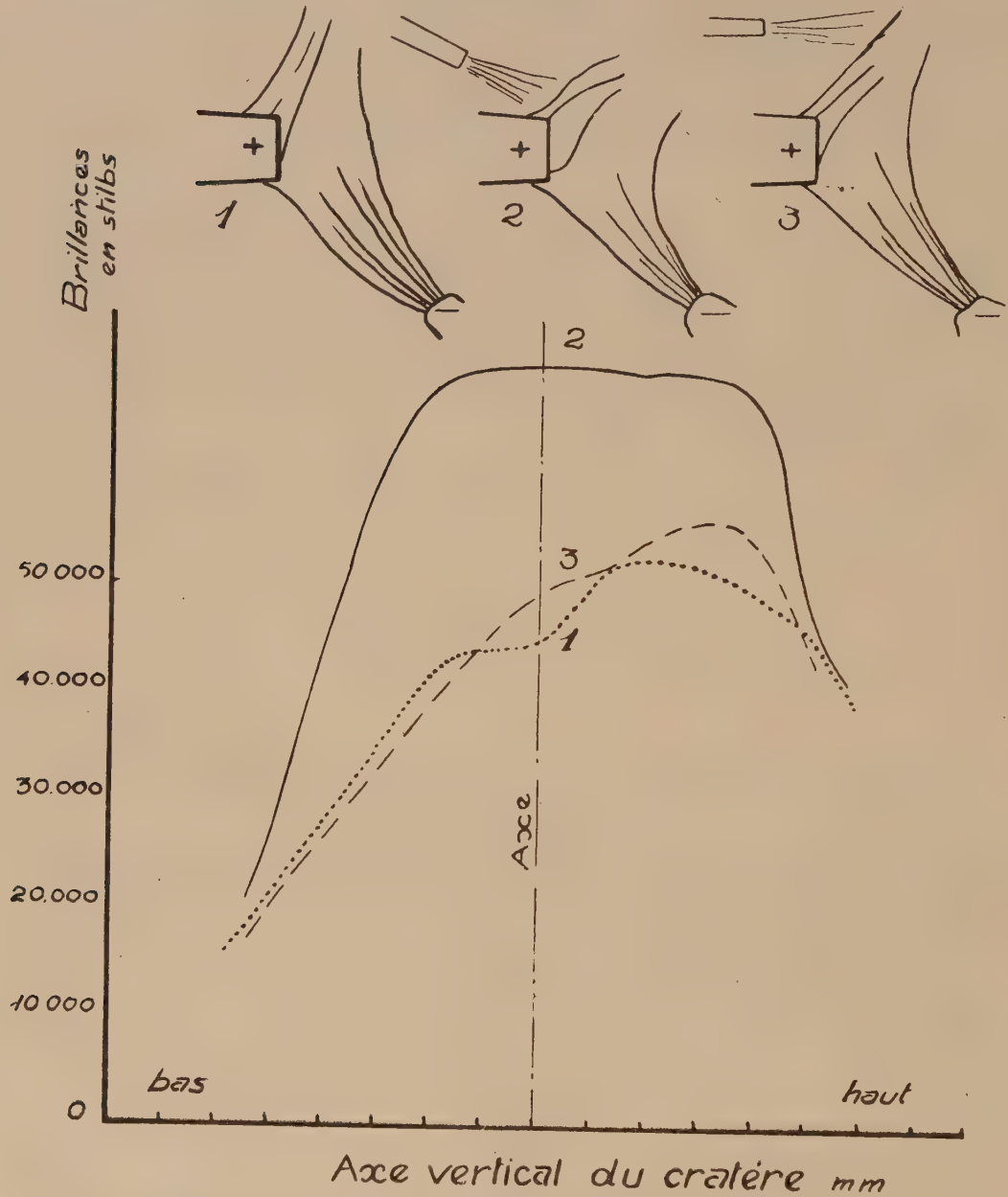


Fig. 31. — Effet d'un soufflage.

Angle 45°. Impact — 7,2. 150 A/75 V.

Charbons₊Orlux : — 555 Φ 11 mm; + 550 Φ 16 mm.

A ce sujet, il convient de mentionner le brevet français 641 944 de Y. ROCARD et P. de ROTHSCHILD, délivré le 13 août 1928, d'après lequel on provoque l'effet BECK à intensité réduite, en soufflant de l'air autour de l'arc dans le sens anode-cathode. Il se produit ainsi un effet de trompe qui tend à extraire les gaz incandescents du cratère. Des essais ont été faits au Laboratoire en 1935, dans des conditions un peu différentes de celles du brevet. Les charbons, de diamètre 8, supportaient de 20 à 45 A, et étaient placés dans le prolongement du charbon négatif. L'arc était très rigide et pouvait être très

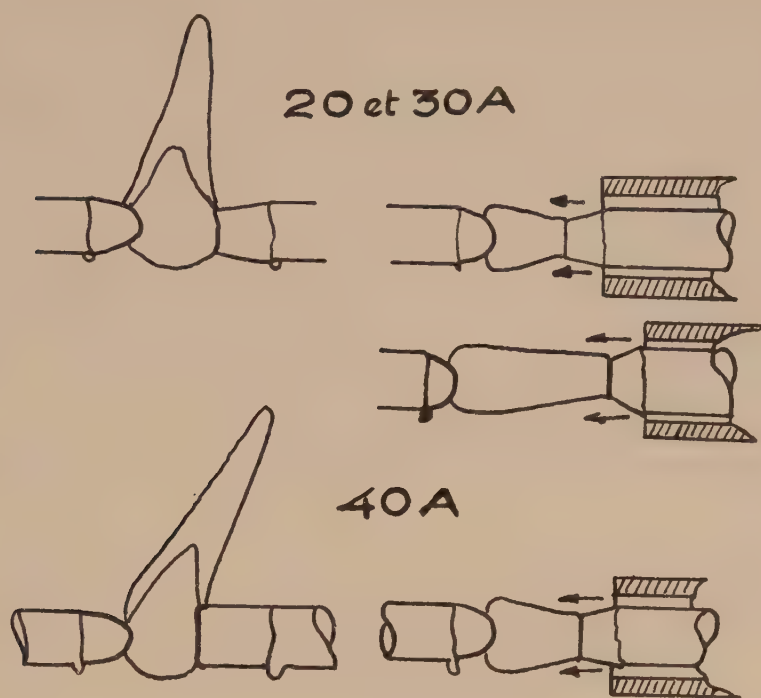


Fig. 32. — Soufflage de gaz.

allongé sans se rompre (*fig. 32*), mais la brillance du cratère n'était pas augmentée, parce que la densité de courant n'était pas suffisante.

Une lampe pour projection cinématographique dans laquelle un soufflage d'air dans le sens anode-cathode est réalisé, a été présentée à la Foire de Paris en 1949. Son caractère essentiel est l'utilisation de l'effet de trompe pour extraire les vapeurs du cratère et augmenter la brillance. De petits ajutages, disposés autour du charbon positif, dans une tête qui assure l'amenée du courant et l'avance du charbon, envoient l'air d'une soufflerie en direction du charbon négatif. Cet air, qui enrobe et entraîne les vapeurs anodiques, est repris par une buse au-dessus du charbon négatif et envoyé à la cheminée. Le charbon négatif est incliné. La brillance, la tension aux bornes de l'arc, l'usure sont accrues. L'augmentation de la chute de tension dans l'arc provient, non pas d'un accroissement de la résistance des vapeurs anodiques aux environs immédiats du cratère, mais d'un étalement de ces vapeurs en direction de la cathode. Cette lampe comporte aussi d'autres perfectionnements.

Influences magnétiques. — Un constructeur allemand présenta quelques années avant la guerre une lampe dans laquelle le charbon positif passait dans un solénoïde puissant branché en dérivation sur l'arc. Les lignes de forces étaient parallèles aux lignes de courant, car les charbons étaient placés dans le prolongement l'un de l'autre. Les essais auxquels nous nous sommes livré n'ont pas fait ressortir l'avantage d'un tel dispositif.

Le soufflage magnétique dont les lampes sont parfois munies redresse la flamme vers le charbon positif, afin de l'éloigner du miroir. Il agit en même temps un peu sur les gaz sortant du cratère, et tend à les rentrer, donc à diminuer un peu la brillance. Le renversement du champ produirait l'effet contraire.

On peut conclure que les influences magnétiques, sans être négligeables, n'ont pas une action directe sur la production de lumière, mais qu'elles peuvent augmenter le rendement lumineux en agissant sur l'orientation des jets gazeux.

Tension. — Bien que ce facteur soit d'importance secondaire pour la production de la lumière, je vais l'étudier du point de vue général.

C'est la chute de tension entre les bornes de la lampe qui intéresse l'utilisateur. Cette chute comprend :

- les chutes au contact dans les bornes et les conducteurs;
- les chutes au contact entre les pinces et les charbons;
- les chutes dans les charbons;
- la tension d'arc proprement dite, qui se subdivise en chute cathodique, chute dans la colonne d'arc, chute anodique.

1^o ÉTUDE DES CHUTES PARASITES. — Je négligerai les premières qui doivent être d'une petite fraction de volt si la lampe est bien construite.

En ce qui concerne la chute entre les pinces et les charbons, il faut considérer séparément le cas des charbons cuivrés et celui des charbons nus.

a. Charbons cuivrés. — Si la pince est propre et en bon état, la chute de tension entre pince et charbon est inférieure à 0,1 V. Le dépôt de cuivre est d'épaisseur telle que la chute de tension est de l'ordre de 0,2 V à 0,3 V par charbon. Reste la chute dans l'extrémité décuivrée par l'action de la température.

Un charbon correctement fabriqué se décuiivre, une fois le régime établi, sur une longueur constante qui ne dépend que de l'intensité électrique. Le cuivre fond, se rassemble en gouttes et tombe, tandis que la partie décuivrée du charbon, appelée pointe, brûle et prend une forme définie, plus ou moins effilée. La pointe du charbon reçoit et perd de la chaleur suivant le bilan ci-dessous :

Apports.

Chaleur transmise de l'arc par conductibilité.
Chaleur apportée par le rayonnement de la flamme.
Chaleur dégagée par effet JOULE.
Chaleur de combustion de l'écorce.

Pertes.

Chaleur transmise à l'arrière par conductibilité.
Chaleur perdue par rayonnement et convection.

La conséquence est une certaine distribution de la température qui décroît de l'extrémité de la pointe, où l'on peut la supposer de l'ordre de 3700°C jusqu'à la base où elle est celle de la fusion de l'eutectique Cu-OCu_2 , soit 1065°C . La longueur de pointe dépend des propriétés électriques et thermiques de l'écorce. Les écorces à base de noir de fumée, de coke, de graphite artificiel, et de graphite naturel ont des conductibilités électriques et thermiques qui croissent du noir de fumée au graphite. On sait faire des écorces dont la conductibilité électrique à froid croît de 145 à $1700\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$, et dont les conductibilités thermiques, dont nous ne connaissons que les valeurs relatives, croissent dans le même ordre. Ce fait d'expérience est confirmé par FINKELNBURG et SCHLUGE, d'après lesquels la loi de WIEDEMANN-FRANZ s'applique au carbone [44 bis]. Si l'on considère, toutes choses égales d'ailleurs, les longueurs de pointes obtenues en fonction de la densité de courant, avec des charbons dont les écorces ont des conductibilités électriques et thermiques différentes, on distingue deux cas :

Aux densités de courant moyennes et basses, les longueurs de pointes se classent dans le même ordre que les conductibilités électriques et thermiques. La chaleur apportée par conductibilité thermique a donc alors plus d'importance que la chaleur dégagée par effet JOULE, et il n'y a pas intérêt à choisir des écorces très conductrices. Lorsqu'on augmente la densité de courant, les longueurs de pointe croissent, et celle du charbon dont l'écorce est la moins conductrice de la chaleur et de l'électricité augmente tout à coup et devient prohibitive, alors que les autres se sont allongées modérément. En continuant d'augmenter la densité de courant, les charbons s'effilent successivement, et pour une densité de courant d'autant plus élevée qu'ils sont plus conducteurs. L'effet JOULE devient donc prépondérant aux densités de courant élevées, et une haute conductibilité de l'écorce est alors à rechercher.

Les charbons anodiques se classent dans le premier cas. Il n'y aurait donc pas un gros intérêt à chercher à diminuer la chute de tension dans la pointe en augmentant les conductibilités électriques et thermiques de l'écorce, mais un autre effet est à considérer. Toute cause qui diminue la température du cratère influence le rendement lumineux, et l'on constate que l'augmentation de la conductibilité thermique du charbon est accompagnée d'un abaissement de la brillance. Pratiquement, c'est cette dernière considération qui prédomine, et l'on ne cherche pas à diminuer la chute de tension dans la pointe d'un charbon anodique cuivré, laquelle est de l'ordre de 2 V.

Par contre, pour le charbon cathodique la question est différente, il n'y a alors que des avantages à réduire l'effet JOULE, et la soustraction de chaleur à l'extrémité a moins d'importance. C'est d'ailleurs souvent une nécessité d'augmenter la conductibilité pour que le charbon ne s'effile pas de façon prohibitive. Pratiquement on utilise des charbons dont la conductibilité est comprise entre 225 et $1700\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$. Il faut cependant adapter la conductibilité à la densité de courant, car un refroidissement exagéré de la pointe cathodique peut causer des déplacements de la tache émissive.

La quantité et la qualité du cuivre déposé électrolytiquement sur le charbon jouent bien entendu un rôle important sur la longueur de la pointe. Il faut que la pellicule de cuivre ait une bonne cohésion et qu'elle adhère parfaitement au charbon. Suivant la densité de courant que le charbon doit supporter, son épaisseur varie en général de 0,03 à 0,12 mm.

b. Charbons noirs. — La chute de tension entre la pince et le charbon est assez importante, surtout lorsque le charbon y glisse à frottement doux comme dans les projecteurs militaires. Avec des contacts d'argent bien conditionnés, on peut abaisser ces chutes à 1,5 V pour 150 A. En ce qui concerne la chute dans les charbons, le même raisonnement que pour les charbons cuivrés peut être fait, avec cette différence que la longueur de la partie de charbon parcourue par le courant et exposée à l'effilement par combustion est constante.

Les conclusions sont les mêmes; lorsque la densité de courant est élevée, ce qui est généralement le cas, il y a intérêt à augmenter la conductibilité du charbon cathodique qui peut atteindre $1700 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$, quant au charbon anodique, il faut surtout considérer que toute augmentation de sa conductibilité thermique diminue le rendement lumineux.

2° TENSION D'ARC PROPREMENT DITE. — J'ai traité la chute cathodique. Au sens strict du terme, c'est la chute qui a lieu dans un espace d'épaisseur négligeable au contact immédiat de la cathode. En ce qui concerne l'arc intensif, on peut décomposer la chute anodique en deux parties, la chute anodique proprement dite, qui a lieu au contact de l'anode, et la chute dans les vapeurs anodiques.

On trouve dans la bibliographie plusieurs formules donnant la chute de tension d'un arc au carbone, entre autres les suivantes :

a. Pour des arcs de faible puissance avec électrodes homogènes de carbone :

V étant exprimé en volts, I en ampères, et l en millimètres la formule de M^{me} AYRTON [14] s'exprime, pour un charbon de 10 mm homogène, par

$$V = 38,98 + 2,07 l + \frac{11,66 + 10,54 l}{I}.$$

SEELIGER [27, p. 283 et 284] donne pour la chute cathodique

$$V_c = 7,6 + \frac{13,6}{I}$$

et pour la chute anodique

$$V_a = 31,3 + \frac{(9 + 3,1) l}{I} \quad (sic).$$

NOTTINGHAM [45] a établi la formule générale $V = a + \frac{b}{I^n}$ dans laquelle $n = 2,62 \cdot 10^{-4} T$, T étant la température d'ébullition du corps constituant les électrodes ou de son oxyde.

b. Pour des arcs de forte puissance. — WESTMAN et CLAPSON [46] ont établi la relation $V = 0,99 l$ pour des intensités de 100 à 700 A.

HEATLEY et SOANES [37] ont trouvé pour un arc de 300 A une chute de tension cathodique de 14 V et un gradient de tension de 1 V : mm.

c. Pour des arcs intensifs minéralisés. — Je répète que BASSETT [19] pour un arc de 150 A a trouvé une chute cathodique de 9 V, une chute anodique de 31 V, et une chute dans la colonne de 31 V.

FINKELNBURG et SCHLUGE [35] utilisant une sonde en charbon de 4 mm de diamètre, ont mesuré les chutes de tension anodique pour différents charbons minéralisés de diamètre 7 mm supportant des courants de 30 à 100 A. Les valeurs croissent avec le courant et c'est uniquement à cet accroissement qu'est due l'allure ascendante de la caractéristique tension/intensité de l'arc intensif minéralisé, car la somme de la chute cathodique et de la chute dans la colonne ne varie pratiquement pas de 30 à 100 A. La chute anodique est de l'ordre de 15 à 20 V sur un total de 30 à 35 V pour les charbons diamètre 7 du type courant, supportant les intensités habituelles de 40 à 50 A.

Pour conclure, étant donné un charbon anodique, une brillance à obtenir, une vitesse d'usure à respecter, on cherche l'intensité électrique nécessaire, les positions relatives optima des charbons, et la tension d'arc en est la conséquence.

La caractéristique tension/intensité d'un appairage intéresse le constructeur de la source d'alimentation. La figure 15 et le tableau 29 montrent quelques exemples.

III. — CHARBON ANODIQUE.

Effet Beck. — Lorsque l'effet Beck se produit, la mèche minéralisée du charbon s'use d'abord plus que l'écorce, puisque le cratère devient profond, puis un équilibre s'établit. Si le régime et les conditions extérieures ne changent pas, la forme et les dimensions du cratère restent alors immuables. Lorsqu'on examine un charbon intensif ayant brûlé, on constate facilement, par exemple au moyen de rayons X, que la mèche a perdu une partie de ses matières minérales sur plusieurs millimètres, les parties voisines du cratère en sont presque exemptes. L'écorce, qui contient généralement 0,3 à 0,5 % de cendres, se purifie elle aussi, et se transforme en graphite sous l'action de la température élevée.

Les matières minérales contenues dans la mèche sont vaporisées sous l'action de la température, elles fusent dans le cratère qu'elles remplissent, et s'échappent de ce dernier sous forme d'une flamme brillante qui s'élève au-dessus de l'arc. Le volume apparent des vapeurs minérales croît avec l'intensité, et il est clair en première analyse que ces vapeurs, aussi bien celles qui sont dans le cratère que celles qui sont devant, participent fortement à la brillance de ce dernier; leur température est très élevée. La température de l'arc a fait l'objet de bien des travaux. En ce qui concerne l'arc intensif, des températures de 6000 à 10000° K sont données par différents auteurs (*voir plus loin*). Quoi qu'il en soit, des températures de cet ordre causent, indépendamment de toute influence électrique, un rayonnement intense des vapeurs anodiques, ainsi que leur ionisation régie par la loi de SAHA [48].

Plusieurs auteurs, dont ROHLOFF [16], MANNKOPF [63] et WITTE [49] ont analysé la décroissance de l'émission lumineuse lorsqu'on coupe le courant. Les premiers enregistraient la lumière totale, les seconds se basaient sur des intensités de raies; tous ont conclu à une excitation purement thermique.

Sans approfondir le mécanisme de la production intense de lumière, il ressort que l'apparition et l'augmentation de volume des vapeurs jaillissant de l'anode sont accompagnées d'un accroissement de la chute anodique, qui correspond à un dégagement plus élevé d'énergie à l'anode, et à un accroissement de la brillance. Malgré la chaleur absorbée par leur vaporisation, les vapeurs anodiques sont portées à une plus haute

température lorsque l'effet BECK a lieu. L'évolution du spectre, l'apparition de nouvelles raies, le bleuissement de la lumière, indiquent des états d'excitation plus élevés qui vont de pair avec un accroissement de température.

Cratère. — Il existe une relation entre l'intensité, le diamètre et la profondeur du cratère (voir *fig. 33*). Comme la brillance croît en même temps que l'intensité, il y a une relation apparente entre la brillance et la profondeur du cratère. D'autre part, au seuil de l'apparition de l'effet BECK, on peut avoir pour une même intensité le régime intensif avec cratère et brillance élevée, ou le régime non intensif sans cratère avec

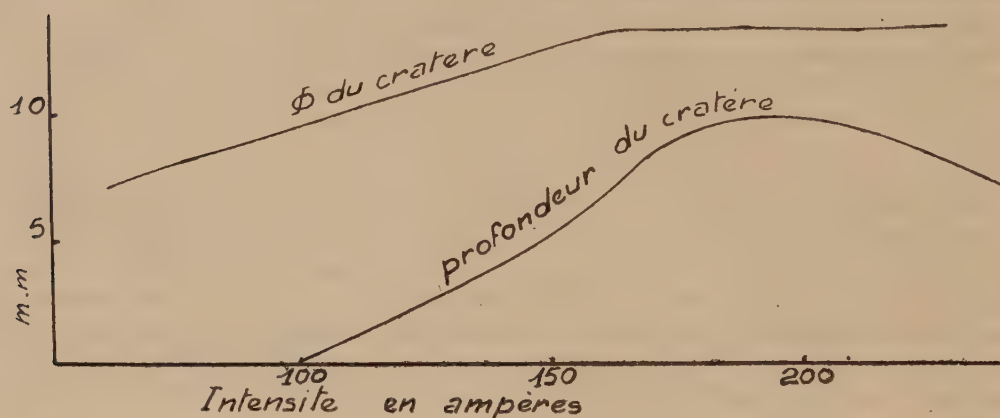


Fig. 33. — Évolution du cratère avec l'intensité.

Charbons Orlux : + 553 Φ 13,6 mm (mèche dure); — 555 Φ 11 mm.

Angle 45°. Longueur d'arc 23 mm.

brillance basse. Enfin lorsque la paroi du cratère est fissurée, la brillance et la tension passent par un maximum lorsque la fente se trouve à la partie inférieure, et par un minimum lorsqu'elle se trouve à la partie supérieure : on voit alors les vapeurs anodiques s'échapper par la fente vers le haut. Le phénomène est très net avec un charbon tournant. Dans une étude récente, KARIAKIN [66 bis] montre la corrélation entre l'évolution du cratère et l'effet intensif.

Je citerai un exemple montrant la relation entre la brillance et la profondeur du cratère. Un charbon de 16 mm, ayant une mèche dure de 8 mm fortement minéralisée en terres cériques, est reconstitué à partir d'une écorce vierge coupée d'équerre et de la mèche dure ayant subi le régime de l'arc.

En appliquant au charbon ainsi formé 200 A/80 V, la brillance passe successivement de 45 000 à 116 000 sb au fur et à mesure que le charbon s'effile et que le cratère s'approfondit.

Ces faits étayent l'opinion souvent émise, à savoir que l'existence du cratère est nécessaire à l'obtention d'une haute brillance. En fait, c'est une question de température des vapeurs minérales. Il est certain que le cratère les canalise et les protège

contre le refroidissement, mais il suffit de concentrer suffisamment d'énergie pour obtenir de très hautes brillances. Voici trois exemples :

1° Le charbon que j'ai cité ci-dessus donne à 150 A/75 V une brillance maximum de 65 000 sb. Si l'on soumet sa mèche dure seule au même régime, on obtient une brillance de 97 000 sb, et il n'existe alors aucun cratère.

2° GUILLERY et ZILL, d'après FINKELNBURG [88] ont mesuré 130 000 sb (sans doute HEFNER) sur des vapeurs anodiques.

3° Le charbon de 1000 A, enfin, de section 20×28 dont la mèche a pour dimensions 18×26 , se conduit pratiquement comme un charbon homogène minéralisé [88].

Le cratère profond semble donc bien jouer uniquement un rôle de protecteur contre le refroidissement des vapeurs anodiques. Quel est le mécanisme de la formation de ce cratère profond? On dit souvent que la mèche brûle ou s'use plus vite que l'écorce. En fait, sauf aux densités de courant exagérées, il n'y a pas de solution de continuité

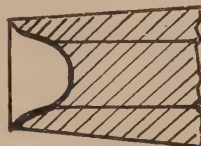


Fig. 33 bis. — Coupe d'un cratère Φ 9 mm à 75 A.

entre l'écorce et la mèche (voir *fig. 33 bis*). Je suppose que le cratère se forme, en gros, de la même façon que pour un charbon non minéralisé, avec cependant une tendance de la mèche à se vaporiser plus vite avant que le régime soit atteint, puisque le carbone, son constituant le plus réfractaire, s'y trouve à un taux réduit. On peut supposer aussi que par suite de la présence de vapeurs ionisables, il y a une concentration du courant sur la mèche, et que l'énergie y est localisée à plus grande densité que sur les parois du cratère.

En projetant l'image du cratère, la tranche de la mèche apparaît plus blanche et plus brillante que celle de l'écorce, mais cela est dû à la brillance des vapeurs qui s'en échappent. Lorsqu'on augmente la densité de courant, on voit ces vapeurs envahir le cratère et masquer de plus en plus l'écorce. L'observateur a l'impression d'un creuset chauffé, par le fond duquel pénétreraient des vapeurs brillantes.

Vapeurs anodiques. — Les vapeurs sortent du cratère en quantité et avec une force d'autant plus grande que l'intensité est plus élevée. Elles semblent repousser de plus en plus la partie cathodique de l'arc jusqu'à la perturber aux fortes densités de courant. La brillance semble bien croître avec leur volume apparent. Si l'on suppose que le fond du cratère reste à la température de sublimation du carbone, donc conserve la même brillance, ce sont les vapeurs anodiques qui fournissent de plus en plus de lumière. M. PERRIN avait essayé de relier la brillance du cratère à l'épaisseur de ces vapeurs. Ayant mesuré pour plusieurs intensités leur brillance dans l'axe juste au-dessus du cra-

tère, il l'avait rapportée à leur épaisseur mesurée latéralement, et avait obtenu une constance remarquable.

	Intensité (A.).	Épaisseur de la flamme (mm.).	Brillance (sb.).	Brillance (sb : mm ² d'épaisseur).
{ Écorce 1632 Φ 16 }	160	2,5	16 800	6 720
{ Mèche 101 Φ 9 }	180	3	20 200	6 740
{ Écorce 1725 Φ 16 }	190	1,9	12 900	6 780
{ Mèche 101 Φ 10 }	200	3,0	21 400	6 790

(Ces écorces sont composées en majeure partie de coke. Les mèches ont 50 % de minéralisation de terres cériques, fluorure et oxyde.)

Le calcul de la distribution de la brillance sur le cratère à partir de la valeur trouvée par millimètre d'épaisseur, de l'épaisseur du bulbe de vapeurs situé devant l'anode, et d'une valeur hypothétique de la brillance du cratère a conduit à des résultats généralement inférieurs aux valeurs réelles. L'écart était d'autant plus grand que la densité de courant, donc le volume de la flamme, était plus élevé.

Il n'est donc pas établi que l'accroissement de brillance soit dû à l'augmentation du volume du bulbe de vapeurs anodiques se trouvant devant l'anode. Le bleuissement de la lumière émise par ces dernières lorsqu'on augmente l'intensité (FINKELNBURG-SCHLUGE [47]) indique une augmentation de température dont l'accroissement de brillance et l'augmentation du volume de vapeurs sont des conséquences qui peuvent être indépendantes entre elles.

J'ai essayé de gonfler artificiellement le jet de vapeurs anodiques en soufflant un gaz dans le fond du cratère, et ai pu faire les constatations suivantes :

Existence d'une pression dans le cratère. — Un charbon de Φ 13,6 était muni d'une mèche dure de 7 mm de diamètre minéralisée aux terres cériques, dans laquelle on avait ménagé un canal de 3,5 mm. Le pied du charbon était relié à un manomètre. Dès l'allumage de l'arc, le manomètre accusait une pression qui croissait avec l'intensité :

125 A/60 V, pression 1,5 mm d'eau

160 A/60 V, pression 3,5 mm d'eau

Par l'observation du cratère dans l'axe, on percevait le canal de la mèche voilé par des vapeurs brillantes. La brillance d'un point de la mèche était 37 500 sb au lieu de 40 000 pour une mèche non trouée, c'est-à-dire très voisine.

Soufflage dans le cratère. — J'introduisais du gaz carbonique dans le cratère au moyen du canal ménagé dans la mèche dure minéralisée. La pression du gaz, à l'entrée du charbon de 50 mm de longueur était de 10 mm d'eau. Dès que le soufflage avait lieu, la brillance passait de 44 000 à 48 500 sb pendant 3 ou 4 mn, puis le canal s'étant agrandi par combustion près du cratère, l'essai devait être interrompu. Pendant le soufflage, le volume de vapeurs, observé latéralement, augmentait comme si l'on avait accru la densité de courant. En portant la pression à 300 mm d'eau, la projection des vapeurs était violente et bruyante, mais l'arc ne s'éteignait pas.

En soufflant de l'azote, les résultats étaient à peu près les mêmes moins la combustion des parois du canal.

	Charbon normal.	Charbon avec canal sans soufflage.	Charbon avec canal et soufflage pression d'eau 1,5 à 2 mm.
Intensité (A).....	120	120	120
Tension (V).....	67	60	72
Profondeur du cratère (mm).....	—	4	7
Brillance (sb).....	47 000	33 000	45 000
			Vitesse d'usure augmentée

Une exagération de la pression abaissait la brillance. En augmentant l'intensité, on voyait les vapeurs brillantes voiler le canal, puis le masquer complètement, que le soufflage ait lieu ou non. La brillance limite à laquelle on tendait semblait être la même avec ou sans soufflage.

Je rappelle l'effet d'un soufflage de la flamme cité à propos des influences hydrodynamiques extérieures. Le jet d'air soufflait la flamme et tendait à sortir les vapeurs du cratère (voir *fig. 31*). On obtenait ainsi pour une même puissance dépensée une augmentation de la brillance maximum qui passait de 52 000 à 70 000 sb. La brillance moyenne était presque doublée. Enfin le dispositif ROCARD agit théoriquement dans le même sens par effet de trompe.

Les résultats de ces expériences ne font que confirmer la relation entre la masse des vapeurs et leur brillance. Ils ne permettent pas de dire si une masse plus volumineuse de vapeurs rayonne davantage parce qu'elle est plus chaude, ou parce qu'elle est plus épaisse. La chute de tension, donc l'énergie dégagée, croît en effet en même temps que le volume, mais l'énergie est surabondante, puisque la température des vapeurs s'accroît FINKELNBURG et SCHLUGE [35] ont trouvé expérimentalement que la brillance varie comme la vaporisation rapportée à l'énergie dégagée

$$B = 1,3 \cdot 10^{10} \frac{A - A_0}{W_a};$$

A, matière vaporisée dans l'unité de temps;

A₀, matière brûlée dans l'unité de temps;

W_a, énergie apportée à l'anode, dans l'unité de temps.

Comme

$$A - A_0 = \frac{W_a - W_n}{Q};$$

W_n, étant l'énergie perdue par convection et conductibilité;

Q, la chaleur de vaporisation, d'échauffement et d'expansion des vapeurs.

Il vient

$$B = 1,3 \cdot 10^{10} \frac{W_a - W_n}{Q \cdot W_a} \quad [33].$$

Influence de l'écorce. — J'ai dit à propos de l'étude des chutes de tension dans la pointe des charbons que la conductibilité thermique de l'écorce a une incidence sur la température du cratère, donc sur sa brillance.

La figure 34 montre l'influence de la conductibilité de l'écorce. Les charbons dont les brillances relatives y sont reportées contenaient des taux de noir de fumée croissants, et leurs conductibilités, tant électrique que thermique, se classaient dans l'ordre inverse de ces taux.

Cet exemple est relatif à une variation de composition de base, mais la technique

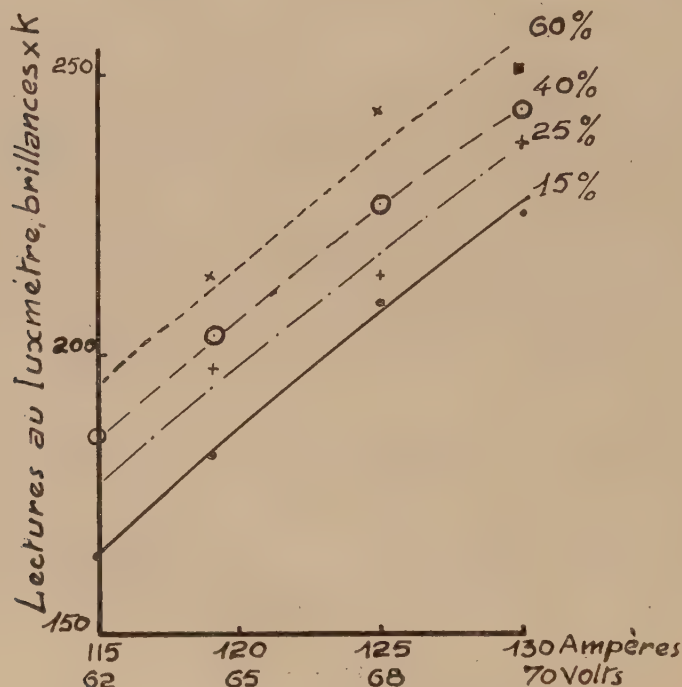


Fig. 34. — Influence de la conductibilité de l'écorce.

de fabrication influence aussi les propriétés d'une écorce. Une écorce peu dense et poreuse est généralement peu conductrice. La température de cuisson joue un rôle important, surtout si l'on atteint celles où la recristallisation du carbone est active, dites températures de graphitisation. Les conductibilités électriques et thermiques sont alors fortement augmentées et il s'ensuit un abaissement net de la brillance. Voici un exemple :

Charbon *Orlux* 591-06 Φ 16 à 200 A/80 V.

Écorce normale au coke, cuite un peu au-dessus de 1000°. Brillance maximum 91 500 sb.

Même écorce recuite vers 2500°. Brillance maximum 87 500 sb.

La température de cuisson agit d'autre part aussi sur la combustibilité, laquelle

dépend aussi de la nature des matières premières, de la technique de fabrication, et la présence d'impuretés minérales, dont certaines catalysent fortement la combustion du carbone. La présence de matières minérales dans l'écorce est également dangereuse à un autre point de vue. Sous l'action de la température, elles se vaporisent toutes plus ou moins près du bord du cratère, et comme leurs vapeurs sont très conductrices, elles dérivent une partie de l'arc. Si elles sont en faible quantité et bien réparties, il s'ensuit un amorçage permanent de l'arc sur les parois du cratère, sinon l'amorçage est irrégulier dans le temps et il s'ensuit des fluctuations de brillance.

L'état physique de l'écorce, enfin, doit répondre à certaines conditions. Les fissures laissent échapper les vapeurs présentes dans le cratère. Il arrive qu'il se produise ainsi un amorçage assez important pour déformer le cratère et causer une forte perturbation lumineuse. D'autre part, une écorce d'aspect homogène peut être fragile et ne pas supporter l'élévation brutale de la température causée par l'allumage ou le rallumage sans danger de bris. Le fabricant de charbon doit savoir éviter ces défauts.

A propos des pertes de chaleur dues à la conductibilité de l'écorce, il convient de mentionner les travaux récents sur le refroidissement intense par l'air et surtout par l'eau, des pièces d'amenée le courant ⁽¹⁾, ⁽²⁾. Comme on pouvait s'y attendre, ce refroidissement abaisse fortement la brillance du cratère. Par contre en surchargeant les charbons, on peut atteindre des brillances plus élevées que dans les conditions normales.

Influence de la mèche. — *Forme et texture.* — Les charbons d'arc ont généralement une section circulaire. Des fabricants ont cependant lancé sans grand succès des charbons à section rectangulaire ou carrée dans le but de rendre la source de lumière homothétique de l'image projetée. Le charbon allemand pour projecteur de 1 000 A, mis au point pendant la guerre, aurait une section rectangulaire afin que les bords du faisceau lumineux projeté soient plus nettement délimités. Il s'agit là d'exceptions, en tous cas la mèche a toujours à peu près une section de même forme que l'écorce et lui est centrée. Les charbons dans lesquels la mèche ne remplit pas ces conditions ne sont pas des charbons intensifs.

Considérons le cas de charbons à section circulaire, la mèche peut être filée et cuite avant d'être introduite dans l'écorce, ou être introduite dans cette dernière à l'état de pâte.

Dans le premier cas, on scelle la mèche dans l'écorce au moyen de colles minérales ou de colles organiques qui sont ensuite séchées et cokéfiées. Le contact entre la mèche et l'écorce doit être aussi parfait que possible, mais il faut souvent réserver un certain jeu. Les dilatations d'origine physique ou chimique qui s'effectuent sous l'action de la température, suivies de contractions après extinction de l'arc, sont en effet souvent différentes pour la mèche et pour l'écorce, et il arrive que cette dernière se fende si le jeu au départ n'est pas suffisant.

Lorsqu'on introduit la mèche sous forme de pâte dans l'écorce, et qu'on la sèche et la cokéfie ensuite, il peut se produire un retrait qui nuit à l'adhérence entre les deux

⁽¹⁾ W. FINKELNBURG, *Effect. of carbon cooling on high current arc* (*J. of the Soc. of Motion pict. eng.*, 52, 1949, n° 4, p. 407).

⁽²⁾ JONES et BOWDITCH, *Optimum performance of high brightness carbon arcs* (*J. of the Soc. of Motion pict. eng.*, 52, 1949, n° 4, p. 395).

corps. Pour éviter ce défaut, on donne souvent au canal une section étoilée afin que la mèche se coince par retrait dans les cannelures (*fig. 35*). Cette forme particulière n'affecte en rien le fonctionnement du charbon et donne une garantie d'adhérence de la mèche à l'écorce.

Les mèches réalisées par les deux techniques diffèrent par leur compacité et leur conductibilité électrique. A composition égale, les premières éclairent moins et usent moins pour une même densité de courant, mais permettent l'application d'une densité de courant plus élevée. Quelles que soient les techniques d'élaboration et d'introduction des mèches, l'expérience permet de dégager quelques principes généraux.

Les mèches comportant des constituants très différents, il est évident qu'il y a intérêt

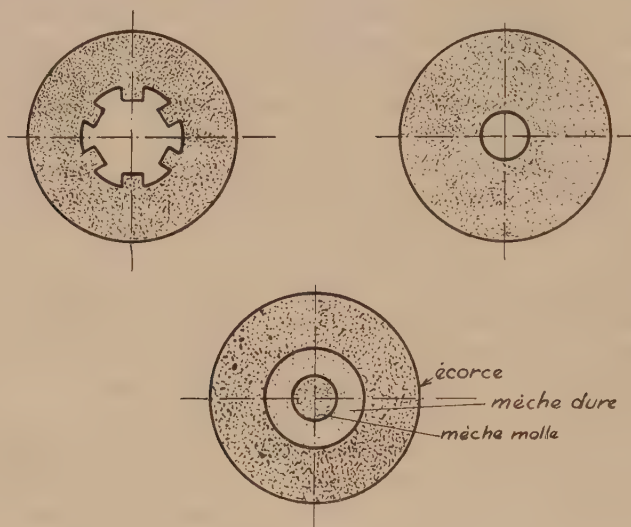


Fig. 35. — Sections droites de quelques anodes.

à rendre leur homogénéité aussi parfaite que possible. Si la répartition des constituants est mauvaise, ou si la texture de la masse rend possible l'amas de sels minéraux fondus, ces derniers ne se vaporisent pas régulièrement et peuvent être projetés hors du cratère. Il s'ensuit une perturbation de l'arc et, si la force de projection est suffisante, ces sels fondus peuvent venir se coller sur le dispositif optique et l'endommager. La poudre de charbon dont les mèches comportent toujours au moins 20 % en poids, doit constituer un continuum suffisamment solide et poreux pour résister à la poussée des vapeurs minérales, les diviser, et jouer en quelque sorte le rôle d'un filtre. En effet, les matières minérales, qui sont moins réfractaires que le charbon, se vaporisent à une distance d'autant plus grande du fond du cratère qu'elles sont moins réfractaires. On peut se rendre compte du phénomène en étudiant par diffraction de rayons X les tranches successives de la mèche d'un charbon ayant fonctionné. C'est ce qu'a fait M. BAROIN.

M. BAROIN a analysé par diffraction de rayons X la matière de la mèche, en partant du fond du cratère, et en s'avancant vers la partie de la mèche n'ayant pas subi l'action de la température de l'arc.

Voici ses conclusions :

— Couche de 1,5 à 2 mm tapissant le fond du cratère, friable et assez claire. Spectre du graphite et de l'oxyde de terres cériques bien cristallisés.

— Couche suivante jusqu'à 3 mm. Mêmes spectres, mais celui du graphite comportait des raies plus nombreuses et plus intenses.

— Couches suivantes. Le spectre de l'oxyde de terres cériques a disparu à peu près complètement pour faire place à celui du fluorure des terres cériques dont les raies d'ordre supérieur apparaissent de plus en plus nombreuses; pas de raies du graphite, raies granuleuses indiquant un grain élémentaire développé. Le spectre du fluorure se précise de plus en plus aux dépens de celui de l'oxyde dont il n'apparaît plus que les deux premières raies.

L'état physique de la mèche, la nature du charbon qui y est introduit, influencent ses conductibilités électrique et thermique. Ainsi que je l'ai exposé à propos de l'écorce, la température du cratère, et par conséquent sa brillance, sont d'autant plus élevées que la conductibilité thermique de la mèche est plus faible.

Diamètre de la mèche. — D'après GEHLOFF [50], BECK découvrit l'avantage d'une grosse mèche. Les charbons intensifs mis au point aux États-Unis d'après ses procédés avaient une mèche d'un diamètre sensiblement moitié de celui de l'écorce. Peu après la première guerre mondiale, les Allemands mirent au point des charbons à mèche plus grosse qui supportaient 225 A au lieu de 150 A pour un diamètre de charbon de 16 mm. Ce procédé a été largement employé par tous les fabricants de charbons d'arc.

La figure 35 bis montre les relations entre la grosseur de la mèche et les résultats obtenus pour des charbons de diamètre 16 mm comportant une mèche dure minéralisée aux terres cériques.

Intensité (tension 70 à 90 V) (A).	Diamètre de la mèche											
	8 mm.				9 mm.				10 mm.			
	Brillance maximum (sb).	Usure horaire (mm).	Cratère (mm).		Brillance maximum (sb).	Usure horaire (mm).	Cratère (mm).		Brillance maximum (sb).	Usure horaire (mm).	Cratère (mm).	
			Φ.	Prof.			Φ.	Prof.			Φ.	Prof.
150.....	605	137	13	5	590	126	13	2,7	—	—	—	—
160.....	740	186	13	5	635	154	13	4,7	—	—	—	—
170.....	775	234	14	6,5	695	194	13,7	5,5	—	—	—	—
180.....	840	270	14,2	8,5	825	234	13,7	6,5	835	292	14	5
190.....	—	—	—	—	925	296	14	8	845	300	14	6
200.....	—	—	—	—	1140	363	15	5,5	1000	390	14,5	7
210.....	—	—	—	—	—	—	—	—	1010	444	14,5	6,5

Fig. 35 bis.

Pour chaque diamètre de mèche l'intensité supérieure essayée correspond à l'apparition de fumées noires et à une instabilité nette de l'arc. On voit que pour un même diamètre de charbon, la densité de courant admissible dépend dans une large mesure de la grandeur relative de la mèche. A régime égal, le charbon a une brillance maximum d'autant plus élevée, et une usure d'autant plus grande, que le diamètre de la mèche est plus petit. La densité de courant admissible pour un charbon dépend beaucoup plus du diamètre de la mèche que de celui du charbon. En effet, si l'on recherche la relation qui existe entre l'intensité limite que peuvent supporter les charbons composés d'un type d'écorce et d'un type de mèche donnés, et le diamètre de la mèche, on trouve une loi à peu près linéaire, quels que soient les diamètres relatifs de la mèche et de l'écorce.

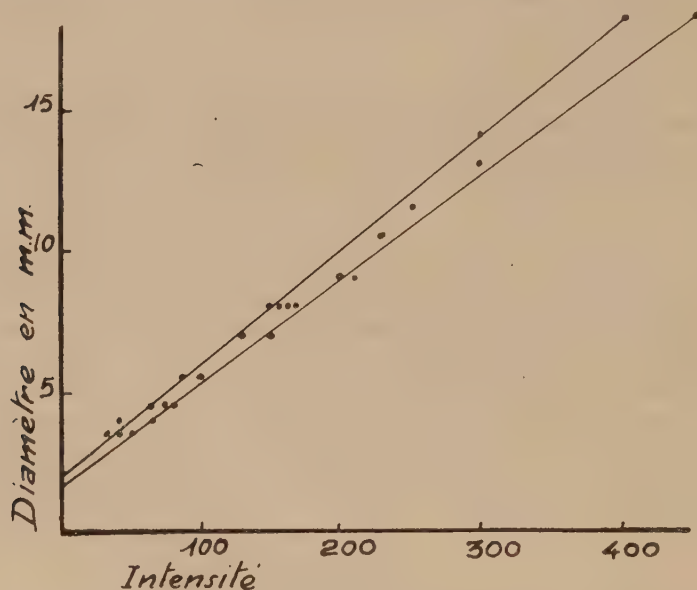


Fig. 36. — Relation entre le diamètre d'une mèche dure et l'intensité.

FINKELNBURG et SCHLUGE ont trouvé pour des charbons semblables des lois de proportionnalité analogue entre l'intensité pour laquelle se produit l'effet BECK et le diamètre [44], entre l'intensité nécessaire pour avoir une même brillance ou un même rayonnement total et le diamètre [44 *ter*]. Ces lois, qui se vérifient pour les diamètres 7, 9, 11 mm, sont en défaut pour le diamètre 5, et ne sont peut-être qu'approximatives pour les diamètres supérieurs, mais elles confirment bien notre constatation. Le phénomène peut être analysé de la façon suivante. On peut admettre d'après ÉLENBAAS que le point d'analogie le plus important de deux arcs de même nature est leur température. Pour avoir un apport d'énergie égale, l'intensité devrait croître comme le carré du diamètre. Les pertes d'énergie du cratère par rayonnement et conductibilité vers l'arrière croissent comme le carré du diamètre, mais les pertes latérales par rayonnement et convection ne croissent que linéairement avec le diamètre. D'autre part, plus le bulbe de vapeurs rayonnantes est gros, plus l'absorption du rayonnement des parties internes

est élevée. Sans expliquer formellement le phénomène, ces considérations font concevoir que densité de courant égale ne signifie pas charge énergétique égale.

La valeur de la brillance mise à part, sa distribution sur la surface du cratère dépend beaucoup de la grandeur de la mèche; plus la mèche est petite, plus la différence de brillance est grande entre le centre et les bords. Comme on cherche généralement à éclairer l'objet de façon aussi uniforme que possible, il y a intérêt à ce que la distribution de la brillance sur le cratère ne soit pas trop inégale.

Minéralisation de la mèche. — *a. Nature.* — Je ne considérerai tout d'abord que les charbons minéralisés aux sels de métaux de la famille du cérium. Leur spectre d'arc est très riche. Ces métaux donnent en effet de nombreuses raies dans toute l'étendue du spectre et particulièrement dans le bleu et le vert. La distribution spectrale de la lumière des charbons qui en contiennent se rapproche toujours plus ou moins de celle de la lumière solaire.

On introduit généralement dans les mèches les métaux de la famille du cérium dans la proportion où ils se trouvent dans le minerai, par exemple :

O_3Ce_2	50 % environ	O_3Pr_2	8 % environ
O_3La_2	25 »	O_3Sm_2	5 »
O_3Ne_2	12 »		

On peut supposer que tous ces métaux peuvent prendre comme le cérium de nombreux états d'excitation, et se comporter de même à ce point de vue particulier. Le thorium, qui se trouve présent dans les mêmes minerais, doit être éliminé. Pourtant, pendant la guerre, on a dû employer des fluorures dans lesquels le thorium était présent. Voici quelques compositions :

Fluorures de terres rares.

Exemple 1.		Exemple 2.	
Fluorures des métaux cé-		F_3Ce	94
riques exprimés en F_3Ce .	82,8	O_2Ce	2
Oxydes exprimés en O_2Ce .	8,5	CO_3Ca	0,4
OCa	0,2	F_2Ca	0,5
Oxydes Fe et Al.....	0,5	SO_4Ca	0,1
O_2Si	0,8	O_2Si	0,7
		O_3Al_2	0,7

Fluorures de terres rares et thorium.

F_4Th	16,0	O_3Fe_2	0,3
F_3Ce	73,6	O_2Si	2,7
O_2Ce	3,8		
OCa	3,2		

Le thorium, substitué aux métaux de la famille du cérium, donne un rendement lumineux et un spectre très voisins, mais il provoque des inconvénients de fonctionnement sur lesquels je reviendrai.

b. Volatilité. — Les métaux de la famille du cérium (je dirai dorénavant cérium pour simplifier) sont introduits sous forme de fluorures et d'oxydes. En général, on évite d'introduire dans les mèches des produits oxygénés, à cause des déflagrations que leur réduction par le carbone peut produire. Cette règle n'est pourtant pas absolue; si l'oxyde se réduit à haute température, et à condition de bien l'incorporer dans un aggloméré solide, elle peut être enfreinte. C'est le cas pour l'oxyde cérique. Lorsqu'un grain atteint la température suffisante, il est réduit par le carbone à l'état d'oxyde cérique, puis à l'état de carbure de cérium C_2Ce , qui ne se volatilise qu'à très haute température. Si au lieu de l'oxyde cérique, on met dans la mèche du fluorure cérique, ce dernier n'est pas attaqué par le carbone. Il va donc fondre, puis se volatiliser en se dissociant et passer dans l'arc. Lorsqu'on compare des charbons dont les mèches respectives contiennent à peu près les mêmes teneurs de cérium sous forme de fluorure d'une part, et d'oxyde d'autre part, on obtient les résultats rapportés sous forme de courbes sur la figure 37. La brillance, l'usure, la tension d'arc, la profondeur du cratère sont d'autant plus élevées que le rapport $\frac{F_3 Ce}{O_2 Ce}$ est plus grand. Ce qu'on gagne en brillance est donc acquis au prix d'une dépense d'énergie et de charbon. Nous pouvons essayer de nous rendre compte dans quelles mesures respectives ces dépenses croissent en fonction de la brillance. Considérons les deux cas extrêmes des charbons dont les mèches contiennent exclusivement comme corps minéral le fluorure de cérium d'une part et l'oxyde de cérium d'autre part. La brillance B peut être rapportée à l'intensité I , à la puissance dépensée dans l'arc $W = IV$, à l'usure U ou aux produits IU et WU . On obtient les chiffres suivants :

	I.	CeF_3 .	CeO_2 .
$\frac{B}{I}$	$\left. \begin{array}{l} 40 \\ 50 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 0,95 \\ 1,06 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 0,55 \\ 0,75 \end{array} \right\}$
$\frac{B}{W}$	$\left. \begin{array}{l} 40 \\ 50 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 3,00 \\ 2,8 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 1,9 \\ 2,4 \end{array} \right\}$
$\frac{B}{U}$	$\left. \begin{array}{l} 40 \\ 50 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 1,97 \\ 1,56 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 1,76 \\ 1,56 \end{array} \right\}$
$\frac{B}{IU}$	$\left. \begin{array}{l} 40 \\ 50 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 4,9 \\ 3,1 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 4,4 \\ 3,1 \end{array} \right\}$
$\frac{B}{WU}$	$\left. \begin{array}{l} 40 \\ 50 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 0,15 \\ 0,82 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 0,15 \\ 1,0 \end{array} \right\}$

C'est le rapport $\frac{B}{IU}$ qui est le plus remarquable. Il montre que la dépense pour une même quantité de lumière est approximativement la même dans le cas des deux mèches. Le rapport $\frac{B}{WU}$ donne une concordance assez satisfaisante, mais il ne faut pas oublier qu'une partie de la chute de tension, somme de la chute cathodique et de la chute dans la colonne, est constante et ne concourt pas à la production de lumière.

Le fluorure de cérium ne subit vraisemblablement pas de décomposition dans la mèche jusqu'à ce qu'il soit dissocié et vaporisé sous l'action de la température dans la mèche même. Ce phénomène commence à quelques millimètres du fond du cratère, ainsi que le montre l'examen radiographique, et les vapeurs fusent au travers de la masse poreuse de charbon constituant l'ossature de la mèche. Le cérium et le carbone

ont beaucoup d'affinité et tendent à se combiner pour former le carbure de cérium C_2Ce .

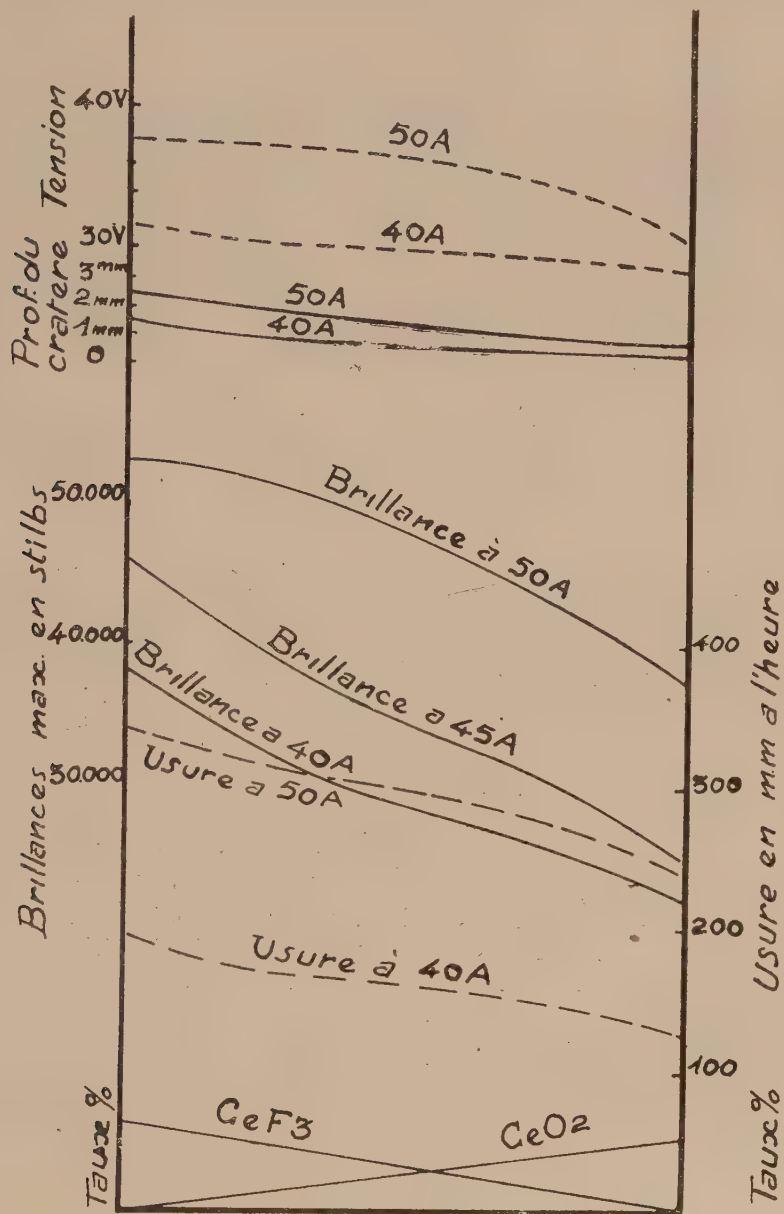


Fig. 37. — Relation entre l'intensité, la tension, l'usure et la profondeur du cratère.
Charbons horizontaux 716, longueur d'arc 6 mm.

Cette réaction peut commencer dans la mèche même, où la température, près du fond du cratère, est suffisante.

Les éléments en présence se trouvent engagés dans les deux équilibres



Le carbure de cérium est très réfractaire; d'après MOISSAN il fond à 2770° K et BASSETT [19] rapporte une estimation de MOTT de son point d'ébullition qui se situerait vers 4970° K. BASSETT, à qui revient le mérite d'avoir publié le premier une étude complète de l'arc intensif [19] admet que le carbure de cérium, très stable à haute température, n'est pas ionisé dans le cratère, et qu'il s'échappe de la mèche sous forme de petites particules portées à température très élevée. Il voit là l'origine de la haute brillance de l'arc au cérium. Ce carbure s'ioniserait ensuite dans les parties moins chaudes, puis les ions se recombineraient dans la partie supérieure de la flamme en donnant lieu à la réaction



Au contraire, si le carbure s'échappe dans l'arc avant d'être complètement ionisé, il donnerait lieu à la réaction de combustion incomplète



d'après laquelle du carbone serait mis en liberté. C'est ainsi que l'auteur explique la formation de fumées noires à partir d'un arc surchargé ou perturbé, BASSETT fait remarquer que les vapeurs s'échappant de la mèche sont peu transparentes et suppose que cela est dû à la présence de particules solides de carbure de cérium. Il est exact que lorsque ces vapeurs sont émises en abondance, elles parviennent à masquer complètement le fond du cratère. Rien ne me permet de trancher sur la présence ou l'absence de carbure de cérium solide dans les vapeurs s'échappant de la mèche. Je me bornerai à énumérer les faits dûment constatés.

Les vapeurs qui jaillissent du fond du cratère et s'élèvent au-dessus du charbon, ne changent pas sensiblement d'aspect dans leur parcours. Lorsqu'elles se mélangent à la partie cathodique de l'arc, normalement aux intensités inférieures à 80 A, accidentellement aux intensités supérieures, elles déposent sur la cathode du carbure de cérium. quand la mèche d'un charbon ne renferme que de l'oxyde de cérium, on remarque que les parois du cratère sont amincies et rongées irrégulièrement de l'intérieur, preuve qu'une réaction chimique intervient pour volatiliser un supplément de carbone. La formation de carbure de cérium expliquerait ce phénomène, mais la mèche seule contient du carbone en surabondance pour donner lieu à la formation de carbure C_2Ce . Par exemple, pour un essai où l'attaque du cratère était considérable, les proportions relatives d'oxyde de cérium et de carbone dans la mèche étaient 55 et 45, alors que les réactions



demandent, pour 55 de CeO_2 , 15,4 seulement de C dans le premier cas, et 11,5 dans le deuxième cas. L'attaque des parois du cratère est donc aussi mal expliquée. Il est cependant bien établi que l'augmentation du taux de fluor dans l'arc diminue, puis supprime l'attaque du cratère ainsi que le dépôt de carbure sur la cathode.

La formation de noir de fumée, que BASSETT attribue à la combustion du carbure de cérium, devrait avoir lieu en abondance lorsque la mèche ne contient que de l'oxyde de cérium. Or il n'en est rien. Que la mèche soit minéralisée au fluorure de cérium ou à l'oxyde, le noir de fumée apparaît lorsque le charbon intensif est surchargé, ou perturbé par un mauvais réglage. Le rôle de la minéralisation doit cependant être prépondérant, puisqu'un charbon non minéralisé ne donne pas lieu à formation de noir de fumée quand on le surcharge. Dans le cas d'une minéralisation au fluorure de cérium, tout se passe comme si les réactions (1) et (2) rétrogradaient dans les zones périphériques de l'arc par suite de l'abaissement de la température. Il se reformerait donc du fluorure, et du carbone serait remis en liberté et oxydé par l'air ambiant en CO puis CO₂, ceci dans un arc bien réglé et non surchargé. De même, dans le cas d'une mèche minéralisée à l'oxyde de cérium, le carbure de cérium produit dans les zones chaudes de l'arc aurait tendance à se décomposer dans les zones périphériques, et le cérium, dont la chaleur d'oxydation est plus élevée que celle du carbone, s'oxyderait le premier. Si la concentration de carbure de cérium est très abondante, le carbone mis en liberté peut ne pas trouver sur place l'oxygène nécessaire à sa combustion. Dès qu'il passe à l'état solide, il s'agglutine en gros flocons, qui offrent peu de surface à la combustion et s'échappent de l'arc. La formation de noir de carbone serait ainsi reliée aux concentrations locales en cérium, carbone, oxygène. Dans le cas de fluorure, on peut observer que si les mêmes réactions se produisaient, il y aurait mise en liberté de fluor ou de fluorure de carbone. En fait les dépôts recueillis dans les cheminées des lampes renferment moins de fluor et plus d'oxygène que les sels de terres rares introduits dans la mèche. Je n'ai pas fait d'étude systématique, et il y a là un point à vérifier.

Le dégagement de noir de carbone est désagréable parce qu'il souille les carters des lampes. Il arrive que par suite d'une fausse manœuvre, en particulier du maintien d'un arc trop court, que ce noir se dépose sur le système optique. Ce dernier ne tarde pas à se briser à cause de l'élévation considérable de la température sous le dépôt de noir dont le pouvoir absorbant est très grand. Cet accident n'est jamais imputable au charbon d'arc mais à la façon dont on s'en sert.

En ce qui concerne la théorie suivant laquelle la présence de carbure de cérium plus réfractaire que le carbone serait la cause de la haute brillance, je montrerai plus loin qu'on peut obtenir des brillances élevées en introduisant dans la mèche des métaux dont les carbures sont moins réfractaires que le carbone, ou même des métaux non carburables.

c. Taux de minéralisation de la mèche. — J'ai considéré le cas de deux charbons dont les mèches étaient minéralisées à un taux optimum. Je vais maintenant examiner le cas d'un charbon dont la mèche contient des taux croissants de fluorure de cérium. La figure 38 montre comment la brillance maximum varie en fonction du taux de fluorure de cérium dans la mèche, et ceci pour différentes valeurs de courant; une petite partie seulement du domaine exploré correspond à un arc stable, aussi les valeurs sont-elles peu précises, mais, considérées dans l'ensemble, elles donnent une idée assez juste du phénomène.

Pour chaque régime, il existe un taux pour lequel le rendement est optimum, et ce taux est d'autant plus élevé que le régime est plus bas. Lorsque la minéralisation augmente, la tension décroît pour les régimes faibles, ne change pas pour le régime moyen,

croît pour le régime élevé. Les profondeurs de cratère suivent en gros les tensions et il est évident qu'elles doivent tendre vers une limite.

L'allure de ces phénomènes s'explique en partant des idées déjà développées. Si l'on admet que le rayonnement dépend de la concentration du plasma anodique en matières rayonnantes, il est logique que la brillance soit proportionnelle à la puissance dépensée et à la concentration de la mèche en matière minérale. D'autre part, à puis-

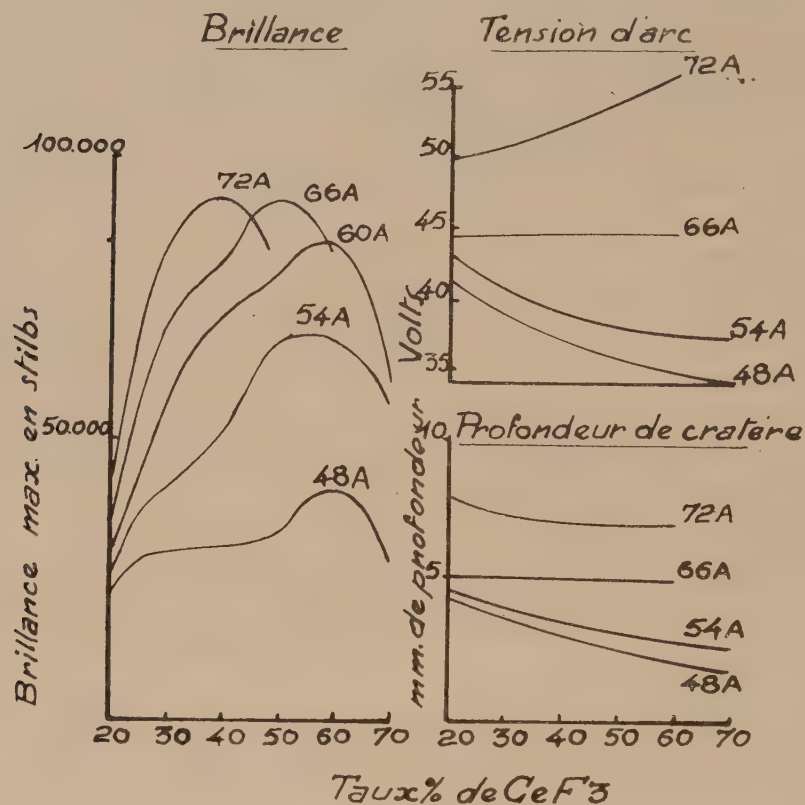


Fig. 38. — Influence du taux de CeF₃.
Charbon + Φ 8 mm mèche de 4 mm. Longueur d'arc 6 mm.

sance dépensée constante, si la quantité vaporisée dans l'unité de temps augmente, la température des vapeurs, et par conséquent leur brillance, est abaissée. Il doit donc bien exister un maximum.

L'évolution de la profondeur du cratère appelle quelques commentaires. Il est évident qu'en régime stable établi, le rapport d'usure entre la mèche et l'écorce est constant. L'augmentation de puissance a donc pour effet de vaporiser plus de mèche et plus d'écorce, mais l'écorce disparaît aussi par combustion. Tant que la brillance est proportionnelle à la puissance, on peut admettre que l'écorce et la mèche disparaissent simultanément, ensuite, il y a déséquilibre, l'usure de l'écorce ne s'accroît plus relativement autant que celle de la mèche. On n'a d'ailleurs alors généralement pas un régime stable,

et la mèche se vaporise par à-coups. TROMBE et FOEX [51] ont montré que la vitesse d'oxydation du carbone subit une chute à partir de 1600° C. L'augmentation de la température de la pointe diminuerait donc l'usure relative par combustion, et pourrait ainsi intervenir sur la vitesse d'usure de l'écorce. Cette influence doit cependant être faible, car d'après FINKELNBURG et SCHLUGE, la proportion de l'anode usée par combustion est petite aux fortes intensités. L'usure et la brillance ne seraient même pas sensiblement affectées si l'air ambiant est remplacé par du gaz carbonique ou de l'oxygène, ce qui est inattendu, et seule une atmosphère d'azote diminuerait nettement ces grandeurs [35]. La cause du déséquilibre d'usure entre la mèche et l'écorce n'apparaît pas clairement.

La profondeur du cratère diminue lorsqu'on augmente le taux de minéralisation. Ceci s'explique par un abaissement de température dû à l'absorption accrue de chaleur par la vaporisation et la dissociation du fluorure de cérium.

La relation directe entre la profondeur du cratère et la tension qui se manifeste aux intensités moyennes et basses est naturelle, puisque les porteurs ont plus de trajet à parcourir. Au régime supérieur, il n'en est plus ainsi, la conductibilité du plasma change, et la raison n'en apparaît pas clairement.

On peut s'étonner que les charbons faisant l'objet de la figure 38 n'atteignent qu'une brillance limite de 90 000 sb, alors que 142 500 sb ont été obtenus avec d'autres charbons (voir *fig. 29-1*), mais les premiers ne sont pas ce que la technique permet de faire de mieux, et ils ont été réalisés afin d'indiquer le sens du phénomène.

d. Répartition de la minéralisation. — Il est courant de faire varier la proportion du diamètre de la mèche par rapport à celui de l'écorce. On peut se demander alors si l'effet de cette augmentation n'est pas dû simplement au fait que par unité de longueur il y a un taux plus élevé de sels minéraux. Dans ce cas, on obtiendrait le même effet en introduisant une proportion plus élevée de sels minéraux dans la mèche. Ceci ne se vérifie que pour de faibles variations du diamètre de la mèche.

Adjonction de corps minéraux peu ou pas générateurs de lumière. — Les charbons couramment utilisés n'ont pas toujours leur mèche uniquement minéralisée aux sels de cérium. On y ajoute souvent d'autres corps minéraux destinés à rendre l'arc plus conducteur ou plus stable. Ces améliorations sont toujours obtenues au prix d'une baisse de brillance. D'une façon générale, ainsi que je l'ai fait ressortir au sujet de la volatilité des sels de cérium, une augmentation de la brillance va de pair avec les augmentations de la tension aux bornes de l'arc, de l'usure du charbon, et de la profondeur du cratère.

Voici à titre d'exemple une analyse de la mèche d'un charbon de 8 mm vendu sur le marché mondial et destiné à des lampes de projection cinématographique :

Fluorures de métaux de la famille du cérium exprimés en $F_3 Ce$.	52,5
Oxydes de métaux de la famille du cérium exprimés en $O_2 Ce$.	15,5
$O_3 Fe_2 + O_3 Al_2$	1,5
$O Ca$	0,95
$O_2 Si$	1,10
OK_2	1,65
ONa_2	1,35

Les métaux alcalins ne sont pas des impuretés, et sont introduits volontairement. On peut trouver dans certains charbons des taux de silicium approchant 10 %. Le brevet français 644 197 du 21 avril 1927 de la Compagnie Lorraine de Charbons pour l'électricité protège l'introduction de carbure de silicium dans la mèche des charbons d'arc.

Les charbons commerciaux ont des caractéristiques différentes de celles représentées

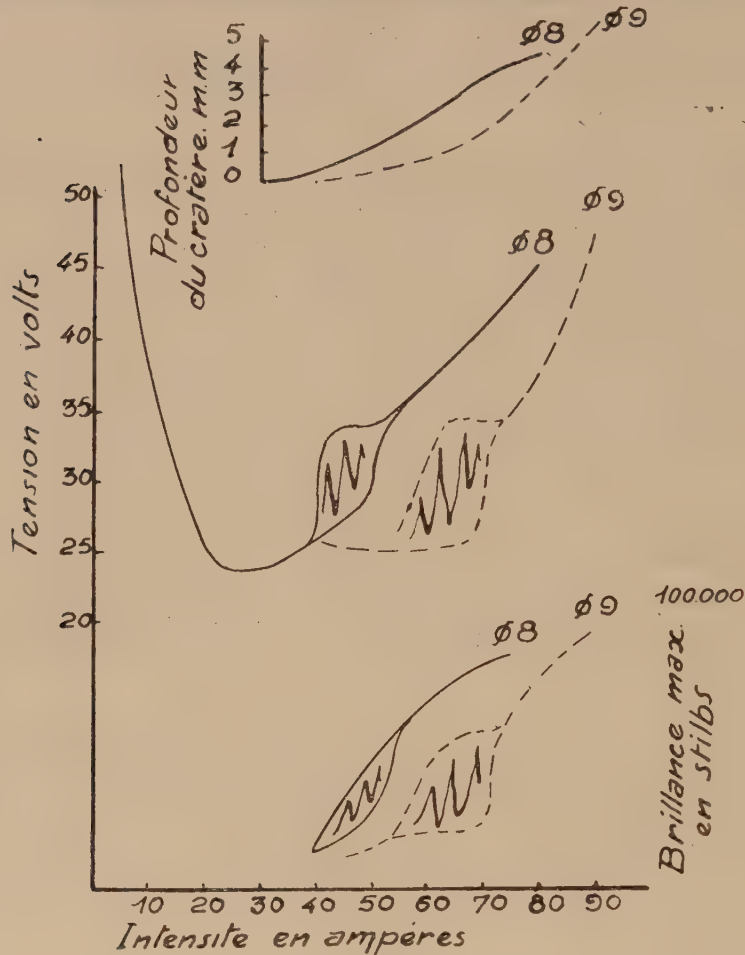


Fig. 39. — Établissement de l'effet BECK.

Charbons Orlux : 544 Ø 8 et 9 mm cuivré; — 545 Ø 7 mm cuivré.
Position horizontale. Longueur d'arc 6 mm.

sur la figure 38 (voir fig. 39). Les différences respectives sont les suivantes pour des teneurs voisines en sels de cérium :

	Tension (V).	Profondeur du cratère (mm).	Brillance (sb).
Charbon d'essai Ø 8 mm 65 A.....	42	4	83 000
Charbon commercial Orlux Ø 8 mm 65 A.....	39	3	74 000

Sur la figure 39 la partie hachurée de la courbe tension-intensité figure la zone instable où l'effet Beck n'apparaît que de façon sporadique et dont il a été question au début de ce Chapitre. L'étendue de cette zone et l'amplitude des variations qui s'y produisent dépendent des caractéristiques du circuit électrique, elle peut être très réduite par l'emploi d'un générateur électrique convenable. Une dynamo Compound à tension constante quel que soit le débit convient bien; la valeur de la résistance de ballast peut alors être très faible sinon nulle.

Ces phénomènes périodiques d'instabilité, qu'on appelle vulgairement « pompages », m'ont fait découvrir la possibilité d'obtenir l'effet Beck en minéralisant la mèche avec des matières autres que les terres rares.



CHAPITRE V.

OBTENTION DE L'EFFET BECK

AVEC DES ÉLÉMENTS AUTRES QUE LES TERRES RARES.

En allumant un charbon de 12 mm de diamètre muni d'une mèche de 4 mm contenant environ 20 % d'un mélange d'acide silicique, d'acide borique et d'oxyde de potassium, il se produisait un phénomène périodique analogue à celui que je viens de décrire. Des vapeurs bleutées jaillissaient brusquement de la mèche, celle-ci se trouait, la tension augmentait de 10 V, l'intensité baissait de quelques ampères, la mèche était plus brillante que l'écorce et de couleur bleutée. Ces phénomènes apparaissaient et disparaissaient simultanément, les caractéristiques électriques reprenaient alors leurs valeurs primitives, le cratère redevenait jaunâtre, la mèche apparaissait alors moins brillante que l'écorce. Après 5 ou 6 cycles successifs, dont les intensités et les fréquences allaient en s'atténuant, on retrouvait le régime normal du charbon non minéralisé. L'ordre de grandeur de l'intensité électrique n'était pourtant que de 30 A, alors qu'un charbon intensif de 12 mm demande au moins 110 A pour donner lieu à l'effet BECK.

L'analogie avec l'établissement de l'effet BECK était frappante, et pourtant ni les matières de la mèche, ni leur taux, ni la dimension relative de la mèche, ni la densité de courant, ne se rapprochaient des conditions d'existence de l'effet BECK classique. J'en déduisis que ce dernier pouvait probablement être entretenu sans présence de terres rares et l'expérience confirma cette prévision.

J'essayai d'abord d'entretenir avec les mêmes matières premières l'effet constaté de façon positive. Ni l'emploi d'une mèche plus grosse, ni l'augmentation du taux des minéraux, ni l'augmentation de la densité de courant, ne me permirent d'aboutir. Je fus plus heureux avec le silicium introduit sous forme de carbure.

Carbure de silicium. — En minéralisant la mèche d'une écorce pour charbon intensif avec 60 à 70 % de carbure de silicium, je pus atteindre les densités de courant usuelles en régime stable, le charbon Φ 9 mm supportait 75 A [54], [55], [56].

La figure 40 montre l'allure de la variation de la brillance en fonction de l'intensité pour divers charbons de diamètre 9 mm à mèche de 4,5 mm. En bas, y figure la courbe relative à un charbon non minéralisé de Φ 14, dont la brillance plafonne pour 50 A. C'est d'ailleurs la limite du régime stable. En haut, la courbe relative au charbon intensif classique minéralisé au fluorure de cérium y est opposée. On voit que la courbe représentative du charbon minéralisé au carbure de silicium à une allure analogue à celle du

charbon intensif, mais que son coefficient angulaire est moindre et diminue quand l'intensité augmente. La brillance ne plafonne pas avant que l'arc devienne instable, ainsi que pour le charbon non minéralisé. La caractéristique tension-intensité est ascendante, le cratère présente l'aspect de celui d'un charbon au cérium, la brillance dépasse largement celle du cratère non minéralisé; en somme les caractères sont ceux de l'effet BECK, mais atténués.

Métaux. — En minéralisant avec du fer, du nickel, du cobalt, l'effet est encore plus net. La même figure porte la courbe d'accroissement relative au nickel et au

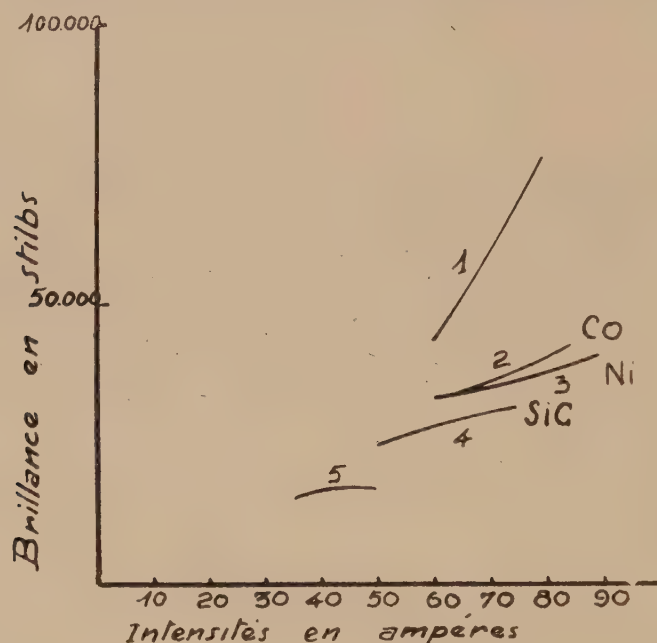


Fig. 40. — Brillance maximum en fonction de I.

Lampe Peerless. + Φ 9 mm tournant; — 8 Φ mm incliné.

cobalt, la figure 41 porte des courbes relatives au nickel et au fer, pour des charbons de 13,6 de diamètre fonctionnant de 110 à 130 A, donc avec dard cathodique. Les résultats sont similaires, les brillances maximum atteintes sont de 34 000 à 37 500 sb pour les charbons de Φ 13,6 et 40 000 à 43 000 pour les charbons de Φ 9.

Ces anodes ne pouvaient être classées dans la catégorie des anodes homogènes ou faiblement minéralisées dont la brillance en régime stable plafonne à 18 000 sb. On connaissait d'autre part les charbons minéralisés aux terres rares dont les brillances pouvaient être accrues en régime stable jusqu'à 120 à 140 000 sb. Les nouvelles anodes étaient bien à classer avec ces dernières. Ces résultats furent obtenus en juin 1933 et firent l'objet de plusieurs brevets de la Compagnie Lorraine de Charbons pour l'électricité [55].

Il est à remarquer que les carbures des métaux expérimentés, de même que le carbure

de silicium, sont peu réfractaires, et qu'ils sont certainement dissociés dans l'arc. La

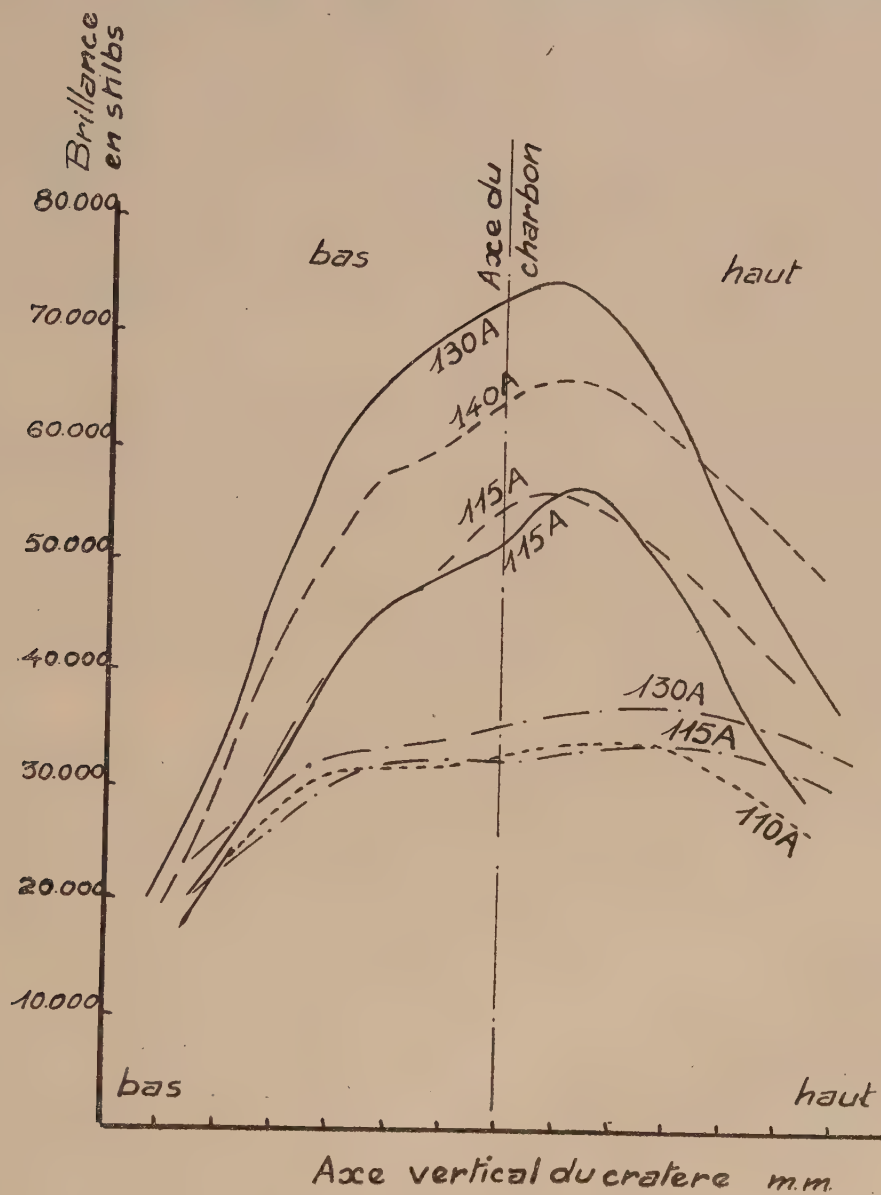


Fig. 41. — Répartition de la brillance sur l'axe vertical.

+ Φ 13,6 mm tournant; — Φ 11 mm incliné.

Minéralisation des mèches : — F_3Ce , — $F_3Ce + Fe$, Ni, -.-.- Fe.

théorie de BASSETT, qui explique l'accroissement de brillance par la présence de carbures réfractaires solides dans la phase gazeuse est donc en défaut.

Fluorures alcalino-terreux. — J'ai rapporté dans la figure 42 les essais les plus intéressants qui ont été faits dans les mêmes conditions. Il a été impossible d'obtenir un effet constant avec les fluorures alcalino-terreux. La mèche apparaît généralement plus sombre que l'écorce, sa brillance est très basse, la chute de tension dans l'arc est très faible, l'arc est bleu violacé, sauf à la périphérie où il manifeste de façon nette le spectre du métal. Par exemple, avec le strontium, la projection de la lumière du cratère donne un effet blanc rosé, tandis que la flamme surplombant l'arc est rouge vif. On obtient donc ainsi surtout le spectre de molécules, tandis que le spectre d'atomes excités n'est pas nul, mais très faible. Brusquement l'effet BECK se manifeste : accroissement de tension, jaillissement d'une flamme, mèche devenant brillante. A ce moment la lumière rayonnée par le cratère devient blanc bleuté aussi bien avec le calcium que le strontium ou que le baryum, mais l'effet est fugitif. Nous verrons plus loin qu'il est tout de même possible de l'entretenir.

Dilution des sels de cérium. — Il était naturel de chercher à mélanger les corps donnant un effet BECK atténué avec les sels de terres rares. Avec 25 % seulement de fluorure de terres cériques, les brillances de l'ordre de celles données par les charbons intensifs normaux furent atteintes au prix d'une légère dépense supplémentaire d'énergie et de charbon, car l'usure est alors accrue. La courbe 41 montre la brillance atteinte avec un charbon dont la mèche contient seulement 25 % de fluorure de terres rares et du fer métallique. Au régime inférieur, 115 A, la brillance est la même que celle du charbon dont la mèche contient 52 % de fluorure de terres rares. Il n'en est plus de même lorsqu'on augmente la densité de courant, mais on obtient cependant des brillances élevées avec une économie de près de 40 % de terres rares.

Composés réfractaires métalliques non oxygénés. — La figure 43 donne quelques résultats obtenus. C'est le ferro-silicium qui est le produit le plus intéressant. Son arc est stable. Il est à remarquer que, comparativement au charbon intensif au cérium, les brillances sont relativement moins élevées que les éclaircissements au centre du faisceau projeté. Cette différence a deux causes : d'une part, les miroirs en verre moulé sont assez imparfaits, et l'image est loin d'être homothétique de la source; d'autre part, la répartition de brillance est plus égale sur le cratère des charbons minéralisés au ferro-silicium que sur celui des charbons minéralisés aux terres cériques.

Thorium. — Le thorium qui accompagne les terres rares dans leurs minerais est toujours éliminé des sels destinés à la minéralisation des charbons d'arc. Lorsqu'on remplace les fluorures des métaux de la famille du cérium par le fluorure de thorium, on obtient un effet lumineux analogue, mais il se produit une forte attaque du cratère semblable à celle que j'ai signalée à propos du cérium. Il en résulte une taille en dentelle des bords du cratère, qui affecte la régularité de l'échappement et du rayonnement des vapeurs émanant de la mèche. D'autre part, on constate souvent des projections de matière fondue, et, à l'extinction, il apparaît des gouttelettes de carbure de thorium dans le cratère. Ce dépôt peut avoir lieu également avec les métaux cériques, mais seulement lorsque ces derniers sont introduits en totalité ou en majeure partie sous forme d'oxydes. Cependant, même lorsque la mèche ne contient que des fluorures, des carbures s'y forment car, en l'humidifiant après fonctionnement, on sent l'odeur qui accompagne les hydrocarbures dégagés.

Lampe Peerless à charbon tournant Φ 9 mm, charbon négatif incliné de Φ 8.

Minéralisation de la mèche de Φ 4,5 mm.	Régime.		Brillance max. (sb).	Éclaire- ment relatif au centre du faisceau projeté (%).	Cratère (mm).		Observations.
	I.	V.			Φ .	Prof.	
Charbon intensif au fluorure de cérium (environ 52 %).	60	—	425	—	—	—	Stable
	70	—	580	—	—	—	
	75	55	660	100	7,5	3,5	
	80	—	770	—	—	—	
70 % carbure de sili- cium.	75	55	310	75	7,5	4,5	Fluctuations périodiques, mèche à peine plus brillante que l'écorce
Fer { 35 % { 25 %}	75	55	—	75	8	5,5	Quelques perturbations périodiques
	75	60	—	63	8	5,0	
Nickel { 50 % { 25 %}	75	57	360	66	7,5	4,0	Des crachements en dehors desquels l'arc est stable
	75	65	—	71	—	—	
Cobalt { 50 % { 25 %}	75	53	380	66	—	—	Mèche plus brillante que l'écorce Lumière blanc verdâtre
	75	65	—	69	7,7	5	
Manganèse 35 %	75	54	—	63	7,3	3	Lumière blanc rosé Perturbations continuelles
Fer 11 %. Fluorure de cérium 41 %	75	60	—	107	—	—	Très stable
Fluorure de strontium 32 %	75	50	—	65 à 75	6,8	2,4	Lumière passant du rouge au blanc bleuté
Fluorure de calcium 20 %	75	45	—	env. 65	7	2,8	Mèche plus sombre que l'écorce, lumière projetée passant du blanc rosé au blanc bleuté
Fluorure de baryum 44 %	75	45	—	32 à 76	—	—	Très instable
Fluorure de magné- sium 28 %	75	58	—	54 à 57	7	5	Très instable
Carbonate de calcium.	80	40	—	—	à peine	—	Mèche plus sombre que l'écorce

Fig. 42.

Pour diminuer les défauts inhérents à l'emploi du fluorure de thorium, il faut en diminuer le taux dans la mèche, mais alors on abaisse sa brillance. L'adjonction de 12 à 15 % d'oxyde de titane à 40 % de fluorure de thorium a permis la réalisation d'un charbon, qui donnait un bon fonctionnement avec un rendement lumineux de 85 % de celui du charbon aux terres rares [56].

Artifices pour l'emploi des fluorures alcalino-terreux. — Les métaux alcalino-terreux sont séduisants. Le baryum précède le lanthane et le cérium dans la classification périodique, il ne diffère du lanthane que par un électron en moins dans le niveau 5d. On peut donc supposer que les spectres sont voisins et même que le spectre de l'atome du lanthane ionisé pourrait ressembler à celui de l'atome neutre du baryum. Le chlorure de baryum m'a permis d'atteindre des brillances de l'ordre de 45 000 sb, en surchargeant un charbon de Φ 7 jusqu'à 70 A. Le charbon de même diamètre minéralisé au fluorure de cérium atteint cette brillance vers 45 A. Le fonctionnement était bon, et la courbe d'accroissement de la brillance en fonction de l'intensité avait alors le même coefficient angulaire que celle de la courbe relative au charbon minéralisé avec des terres rares. La lumière rayonnée était d'un blanc verdâtre assez agréable, mais l'importance de la surcharge nécessaire n'a pas permis d'application économique.

Le calcium et le strontium ont des spectres d'arc qui pourraient compléter utilement celui des terres rares. Ce dernier manque en effet d'orangé et de rouge lorsqu'on le compare à celui du Soleil. On peut aussi penser que pour la projection militaire, l'enrichissement du faisceau en rayons de grande longueur d'onde diminuerait la diffusion atmosphérique, et par conséquent l'éblouissement, tout en augmentant la pénétration.

Il a été possible de faire rayonner les fluorures alcalino-terreux dans le cratère en employant deux artifices :

- emploi d'une double mèche;
- emploi d'écorces peu conductrices de la chaleur.

a. Charbons à double mèche. — L'idée directrice était d'appliquer le principe de la différence de volatilité entre la mèche et l'écorce, la mèche molle à base de fluorure alcalino-terreux étant contenue dans une mèche dure à base de fluorure de cérium, elle-même introduite dans une écorce de charbon pur (*fig. 35*).

L'expérience a montré qu'à des taux respectifs égaux de fluorure de calcium (ou de fluorure de strontium) et de fluorure de terres rares, l'abaissement de brillance était moindre avec deux mèches concentriques qu'avec une seule mèche ou étaient mêlés les deux constituants :

	Brillance en stilbs.		Profondeur du cratère (mm).
	Centre mèche.	Bord mèche.	
Φ 13,5 à 120 A :			
Mèche unique avec terres rares. Ca, Ba, un peu de K.	31 500	30 500	2,5
Mèche annulaire Φ 7 avec terres rares, mèche centrale avec Ca, Ba, un peu de K.....	34 500	33 500	3,0

*Lampe Fersing, charbons horizontaux, longueur d'arc 6 mm.
Charbons Φ 7 positif, Φ 6 négatif.*

Minéralisation de la mèche de Φ 3,5 mm.	Régime.		Brillance max. (sb).	Éclaire- ment relatif au centre du faisceau projeté (%).	Cratère (mm).		Observations.
	I.	V.			Φ .	Prof.	
Charbon intensif au fluorure de cérium (60 à 65 %).	40	32	380	—	—	—	
	45	34	450	100	—	2	
	50	37	535	—	—	—	
Ferrosilicium à 25 % de Si (50 à 70 %). .	40	—	205	—	—	—	Stable
	45	38	225	75	—	2,3	
	50	—	265	—	—	—	
Ferromanganèse 40 %.	45	38	—	69	—	3,3	Stable
Ferrovandium 40 %.	45	39	—	58	—	—	Stable
Ferrocabotitane :							
Béron 50 %	45	30	—	55	—	—	Crachements Assez bonne stabilité
Firminy 50 %	45	34	—	70	—	2,8	
Silicoaluminotitane :							
Béron 50 %	45	34	—	70	—	2,8	Stable
Firminy 50 %	45	36	—	75	—	3	Stable
Silicium 35 ou 50 % ..	45	48	—	—	—	—	Instable
Carborundum 50 % ..	45	27	—	—	—	—	Instable
Ferrotitane 75 (60 %).	45	26	—	62	—	—	Crachements, cratère cranelé
Ferrotitane 205-50 (60 %).	45	28	—	70	—	—	Crachements, cratère cranelé

Fig. 43.

Une comparaison d'une double mèche analogue avec une mèche de même diamètre minéralisée aux terres rares a donné :

	Brillance	
	au centre.	au bord.
Double mèche :		
Charbons ordinaires aux terres rares	43 000	40 000
Charbon double mèche Ca, Ba, K.	38 000	36 500

En regardant le cratère, on aperçoit sur la mèche centrale une luminescence rouge qui se prolonge dans le jet de vapeurs anodiques. La flamme surplombant l'arc est fortement colorée. Le spectre de la lumière émise par le cratère contient les raies des métaux introduits dans la mèche centrale.

Ce procédé a fait l'objet d'un brevet [57].

b. Charbon à écorce peu conductrice de la chaleur [58]. — J'ai déjà signalé la grosse influence de la conductibilité thermique et électrique de l'écorce, qui vont de pair, sur la brillance du cratère. La figure 44 montre la courbe de brillance obtenue avec un charbon minéralisé au fluorure de calcium, dont l'écorce 8165 est peu conductrice de la chaleur, comparativement à deux courbes de charbons minéralisés au cérium et d'emploi courant. L'un de ces derniers donne plus de brillance et plus d'usure que l'autre. On voit que le charbon au calcium a déjà une brillance notable sous une intensité de 150 A, et qu'en poussant l'intensité à 195 A, on atteint la brillance du charbon 550. M. LEDUC a mesuré la conductibilité calorifique radiale de l'écorce 8165, et a trouvé qu'elle était les $\frac{2}{3}$ de celle d'une écorce de qualité courante.

Le tableau ci-dessous montre l'accroissement de la brillance, de la tension, et de la profondeur du cratère. A partir de 195 A, la brillance baisse et le régime devient instable.

Appairage 16/11, positif tournant (angle 30°, longueur d'arc 33 mm).

	Intensité	Tension	Brillance	Cratère		Impact.
				Φ	profondeur	
	(A).	(V).	(sb).	(mm).	(mm).	
Écorce 8165 Mèche 35 % F ₂ Ca.	150	66	41 500	12,5	4,5	0
	165	75	60 000	13,5	7,5	—
	180	77	63 000	14	9,5	—
	195	80	66 500	14,5	10,8	—
	210	84	64 500	14,5	12	—
Charbon 550 Orlux	150	75	65 000	13	4,5	2,4
Charbon 550-01 Orlux . . .	150	78	80 000	14	8	0

Un brevet américain [59] protège un charbon dont la mèche est minéralisée à 60 % de F₂Ca + 10 % de fluorure de terres rares. Il faut charger ce charbon de diamètre 16 mm à 250 A au lieu de 150 à 175 pour un charbon de qualité courante.

Application. — Lorsque pendant la guerre les terres rares firent défaut en France, la dilution du fluorure de terres cériques dans le ferro-silicium permit une économie de 70 % sur cette matière, avec une perte de 15 à 20 % seulement sur la lumière pro-

duite. La qualité de remplacement Orlux 2544 ainsi obtenue fut fabriquée par millions, et donne toute satisfaction à la clientèle.

Lorsque la pénurie de terres rares fut totale, le ferrosilicium fut exclusivement employé

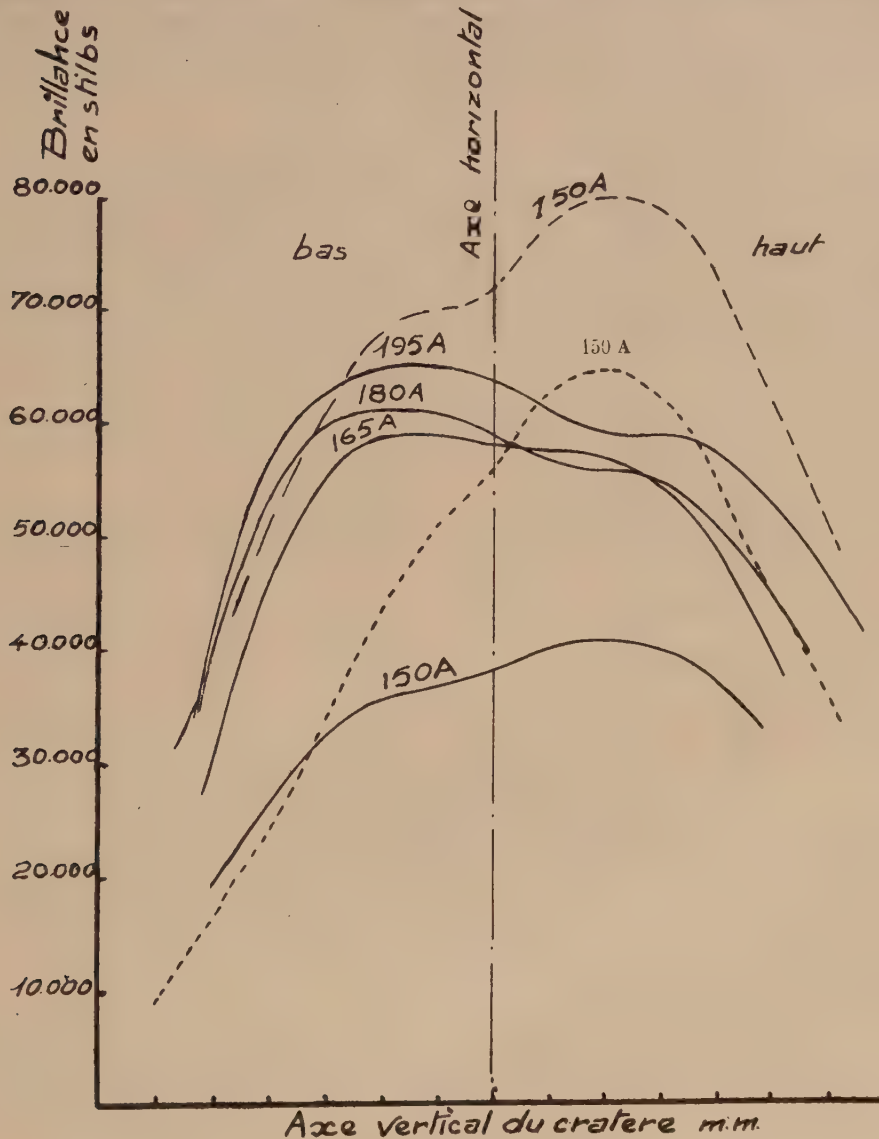


Fig. 44. — Répartition de la brillance sur l'axe vertical.

Angle $30^\circ + \Phi$ 16 mm tournant; — Φ 11 mm.

- Écorce 8165 (mèche 35 % CaF_2), impact 0;
- Charbon 550-01, impact 0, 150 A;
- Charbon 550, impact + 2,4, 150 A.

pour la minéralisation des charbons intensifs destinés à la projection cinématographique. La perte de lumière était alors de 30 % et l'aspect de la projection en souffrait plus ou moins suivant la puissance des installations. Les charbons commerciaux correspondants, Orlux 3544, firent l'objet de brevets [60] et furent utilisés en France. La courbe 45 montre les valeurs de brillance maximum obtenues avec les charbons Orlux 2544 et Orlux 3544. Les différences sont plus grandes en valeurs relatives sur les brillances

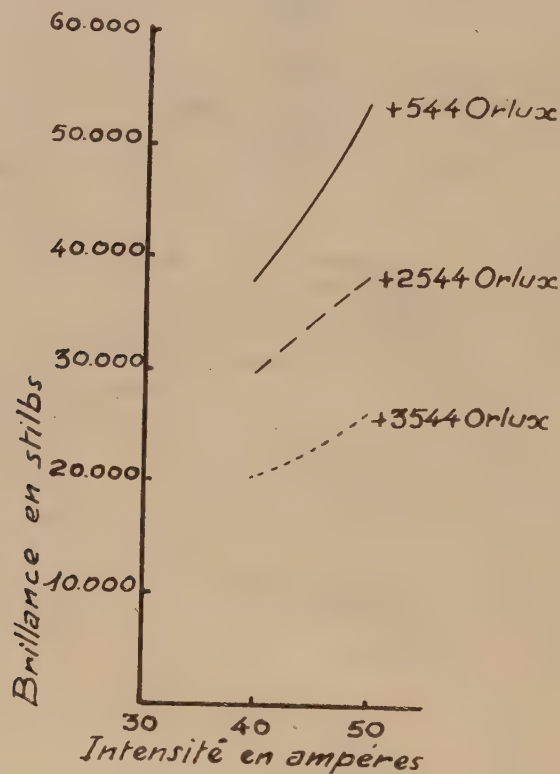


Fig. 45. — Brillance maximum.

- Taux normal de terres rares;
- - - Économie de 70 %;
- - - - Sans terres rares.

maximum que sur les éclairagements obtenus en pratique, parce que la répartition de brillance sur le cratère est d'autant plus uniforme que les charbons renferment moins de terres rares.

Le fluorure de thorium fit la soudure entre cette fabrication et la reprise de la qualité d'avant guerre [56]. La lumière obtenue avec la qualité au thorium, appelée Orlux 644, était de l'ordre de 85 % de celle de la qualité 544 aux terres rares. La projection cinématographique était d'aspect satisfaisant ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ FINKELNBURG mentionne des « Ersatz » à base de fluorure de fer, de fer et de calcium [88].

Les recherches sur l'obtention de l'effet BECK en régime stable avec des substances autres que les terres rares ont permis de suppléer au manque de ces dernières sans obtenir cependant un résultat équivalent. Elles ont d'autre part montré qu'on peut modifier le rayonnement du cratère du charbon intensif, en conservant une brillance élevée, ce qui est important pour les applications cinématographiques. La connaissance de l'aptitude des différents éléments à donner l'effet BECK a conduit à des vues générales, ainsi que le montre le paragraphe suivant.

Emploi du tableau de classement périodique dans les recherches sur les arcs.

— Lors des premières recherches sur l'obtention de l'effet BECK avec différents éléments, M. OSWALD avait remarqué la relation entre la position de ces éléments dans la classification périodique, et leur aptitude à provoquer une brillance élevée du cratère [54]. Il ressortait que les métaux de numéros atomiques 20 à 28 sont nettement avantageux. D'un point de vue plus général, M. OSWALD montrait l'intérêt de l'emploi de la classification périodique dans les recherches sur les arcs. Il distinguait en effet des groupes naturels qui jouissent de certaines propriétés importantes pour l'arc :

- bonne conductibilité : première et deuxième période;
- faible influence sur la coloration des arcs : Si, C, N, O, d'une part, alcalins d'autre part;
- forte influence sur la coloration : alcalino-terreux Ti, V, Cu, Cr par exemple;
- Compatibilité avec les conditions de l'arc intensif : terres rares, éléments numéros 22 à 28;
- Réalisation de sources lumineuses sensiblement blanches : terres rares, Mg, Al, ou bleuâtres : Ti, V, terres rares, Mg;
- réalisation de sources lumineuses ultraviolettes : métaux de transition, terres rares;
- absence de composés trop difficiles à vaporiser : tous les éléments sauf ceux de transition appartenant aux 4^e, 5^e et 6^e périodes.

Les éléments peuvent être aussi groupés en quatre classes :

- métalloïdes et gaz nobles, sans intérêt pour les arcs au carbone;
- alcalins, stabilisateurs, mais à émission lumineuse trop faible;
- alcalino-terreux et terres rares, à forte émission spectrale dispersée surtout sous forme de bandes;
- métaux de transition à spectres très discontinus très riches en ultraviolet.

Les alcalins sont donc des adjuvants, les alcalino-terreux et terres rares des colorants, et les métaux de transition des modificateurs destinés à corriger ou à compléter les spectres des colorants.



CHAPITRE VI.

ÉTUDE SPECTRALE DU RAYONNEMENT. TEMPÉRATURE.

On sait que, dans l'arc classique entre baguettes de charbon techniquement pur, le plasma émet relativement peu de lumière visible, et que cette dernière est pratiquement négligeable devant celle émise par le cratère anodique. La courbe de répartition spectrale de la lumière obtenue est identique à celle du corps noir porté à environ 3800° K, avec quelques vagues dans l'ultraviolet et une dans le violet correspondant aux bandes d'émission de C_2 et de CN. L'examen du domaine visible du spectre révèle, outre les bandes attribuées aux molécules CN et C_2 , des raies dues pour la plupart aux impuretés minérales contenues dans le charbon, car celles de l'atome d'azote sont faibles, et l'atome de carbone n'en donne que deux qui sont peu intenses ($5793,5$ et $7118,61$) d'après N. BRODE [81]. Bien qu'ORNSTEIN ait noté des raies de Ca^+ , Sr^+ , Ba^+ , les raies observées dans le spectre de l'arc sont normalement celles des atomes neutres excités.

L'arc d'un charbon non intensif à mèche est un peu plus riche en raies, mais l'énergie correspondant à ces dernières est encore très faible, car les corps minéraux introduits dans la mèche rayonnent peu dans le visible.

Si l'on minéralise la mèche d'un charbon non intensif avec des corps rayonnant beaucoup dans le visible, leur spectre se révèle avec intensité dans le plasma et dans la flamme de l'arc. Dès que l'effet BECK apparaît, les vapeurs sortant de l'anode émettent alors un spectre de raies très intenses, avec un léger fond continu qui se superpose à celui de la lumière émise par les parois du cratère. Les raies spectrales appartiennent en général au spectre d'atomes neutres, mais plusieurs auteurs ont observé des raies d'atomes ionisés. FINKELNBURG et SCHLUGE [35] ont signalé celles de Ca^+ et de Sr^+ au contact du dard cathodique. RYDE [62], étudiant le spectre de l'arc intensif $150\text{ A}/75\text{ V}$, y a identifié non seulement les raies des atomes neutres C I, N I, O I, H et celles des corps présents dans la mèche, mais aussi quelques raies de N II, et deux ou trois qu'il attribue à C II, c'est-à-dire à l'atome de carbone ionisé. Par la comparaison suivante, il montre que dans l'arc intensif les états d'excitation seraient supérieurs à ceux régnant dans l'arc ordinaire :

	Arc ordinaire.	Arc intensif.	Décharge dans l'hélium entre électrodes de carbone.
Raie C I 4278.....	Faible	Très forte	—
» C II 3920.....	Absente	Présente	Présente
» C II 2837.....	Absente	Faible	Présente

L'émission des raies d'atomes ionisés par l'arc intensif doit cependant être regardée comme exceptionnelle. RYDE [62] signale l'intensité des bandes de SWAN rayonnées par le cratère et au contact de l'anode, en particulier à la partie supérieure. D'après cet auteur, le gaz d'éclairage renforce extraordinairement ces bandes, ce qui les faisait attribuer par JOHNSON à des molécules CH-CH, mais il est classique de les attribuer à la molécule C_2 .

La répartition spectrale de l'énergie rayonnée par l'arc intensif est très différente

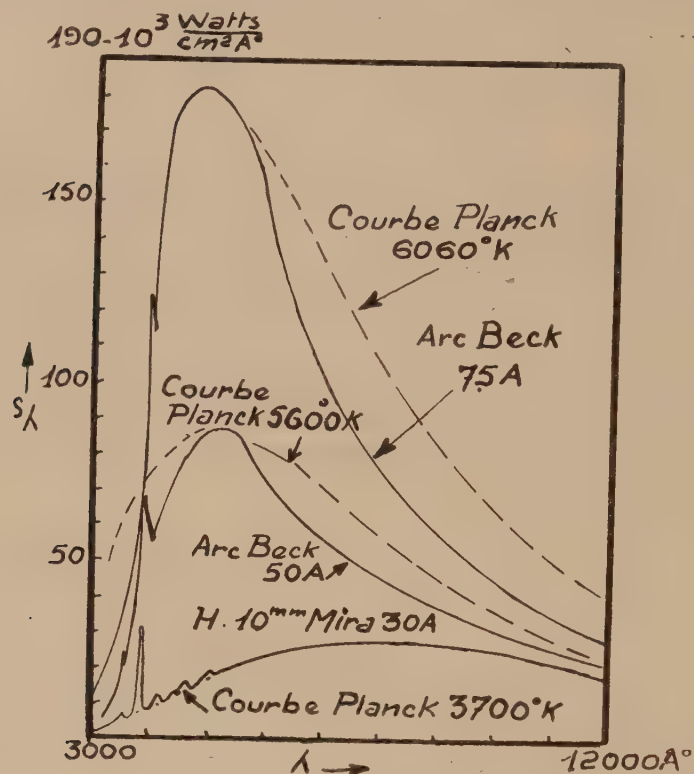


Fig. 46. — Distribution énergétique moyenne.

de celle émise par le cratère non minéralisé. Les courbes de distribution énergétique 1 et 2 de la figure 46 (voir planches) sont respectivement relatives au cratère d'un charbon de diamètre 16 mm brûlant à 150 A/70 V, et à celui d'un charbon de diamètre 7 mm, brûlant à 50 A/39 V. Relevées à l'aide de notre spectrophotomètre elles ne représentent que l'énergie visible. La courbe 3 de la figure 46, que j'emprunte à FINKELNBURG et SCHLUGE [10] montre l'allure du rayonnement global d'un charbon intensif de diamètre 7 fonctionnant à une intensité normale (50 A) et surchargé (75 A). Le rayonnement d'un charbon homogène de diamètre 10 mm supportant 30 A est donné à titre de comparaison.

L'examen du spectre révèle un grand nombre de raies intenses sur un fond continu (voir les spectrogrammes de la figure 24, voir planches) relatifs à un charbon intensif

de diamètre 8 fonctionnant à 40 A). On peut aussi trouver des bandes dans ces spectres, elles sont émises dans les parties périphériques de l'arc, et notamment dans la flamme par les molécules qui s'y trouvent, alors que le centre de l'arc émet surtout les raies des atomes excités. Les spectrogrammes de la figure 47 (voir planches) illustrent cette remarque. Ils correspondent au cratère et à la flamme de charbons diamètre 8 mm minéralisés au fluorure de calcium, supportant soit 32 A, soit 60 A. Les diagrammes 2 et 4 montrent les raies émises par la flamme. Il ne faut pas comparer ces diagrammes en valeurs absolues, car la sensibilité de l'enregistreur n'était pas la même dans tous les cas. A 32 A le spectre de flamme est pauvre et comporte des bandes. A 50 A le spectre de la flamme a évolué, s'est complété, les bandes ont disparu ou se sont atténuées, tandis que les raies sont devenues plus intenses. Le spectre de cratère s'est enrichi également.

Les différences entre l'émission des parties centrales et celles des parties périphériques de l'arc ont été constatées par de nombreux auteurs. MANNKOPF [63] pour mesurer la température d'après l'intensité des raies, visait le centre de l'arc par l'intérieur de l'anode creuse. ORNSTEIN note que les raies du Ca^+ ne s'observent que dans le centre de l'arc.

L'examen des diagrammes de répartition d'énergie spectrale 1, 2, 3, 4, de la figure 48 (voir planches), établis dans les mêmes conditions pour des charbons minéralisés respectivement avec des terres rares (qualité Orlux 544), avec un peu de terres rares diluées dans du ferro-silicium (qualité Orlux 2544), avec du ferro-silicium (qualité Orlux 3544), et avec du thorium et du titane (qualité Orlux 644), révèlent la présence constante de deux fortes « vagues » vers 4700 Å et 5100 Å. Le diagramme 5 de la même figure relatif à un charbon homogène surchargé (Φ 8 à 45 A) montre également la présence de ces deux vagues qui doivent donc appartenir au système carbone, oxygène, azote, et semblent accompagner toujours l'arc intensif. Ces vagues ressortent nettement dans les courbes de FINKELNBURG et SCHLUGE relatives à l'homogène surchargé [10].

J'ai soumis à M. BLAISE, attaché au C. N. R. S. à la Faculté des Sciences de Nancy, plusieurs spectrogrammes obtenus au moyen de l'appareil à réseau JOBIN et YVON (dit sensitomètre). Les charbons de qualité Orlux 544 Φ 8 minéralisés aux terres rares étaient soumis à des intensités respectives de 65 A (régime normal) et 100 A. Il résulta de l'examen que les vagues constatées sur les diagrammes d'énergie devaient être attribuées aux bandes de la molécule C_2 . Au régime surchargé, les intensités des têtes de bandes de 4216 et 3883 Å dues à CN, et 5165,2, 5129,3 de la molécule C_2 , apparaissent inversées, ce qui indique une forte concentration en vapeur de carbone. L'identification des têtes de bandes était rendue difficile par le grand nombre de raies dues aux terres rares. Les terres rares furent alors remplacées par du calcium introduit sous forme de spath fluor.

Les charbons méchés au spath fluor étaient de Φ 8 mm. Les spectrogrammes examinés par M. BLAISE correspondaient aux intensités de 60 A d'une part, et 90 à 120 A d'autre part, ces surintensités étant obtenues par surcharge spontanée (pompage) ou provoquées par modification des caractéristiques du circuit. Les résultats sont les mêmes dans les deux cas. La surintensité provoque de façon très intense le renforcement des bandes dues à la molécule C_2 , dont les têtes ont pour longueur d'onde :

4678, Å	4715,2 Å	5129,2 Å	5540,7 Å
4681,9	4737,1	5165,2	5585,5
4684,8	5097	5551,9	5635,5
4697,6			

Certaines sont à peine perceptibles sur le spectrogramme de référence. Le groupe 4367,2-4371,4-4382,5 est également renforcé, mais il est moins intense que les précédents.

Les bandes dues à C N, dont voici les longueurs d'onde de tête :

3583,9 Å	3850 Å	3871,4 Å	4167,6 Å
3585,8	3854,9	3883,4	4180,8
3540,9	3861,7	4158	4197,1

sont à peine renforcées par la surintensité.

Les raies du calcium et du baryum sont renforcées. Il apparaît une bande très intense dont la tête a pour longueur d'onde 6086,5, et dont l'origine est ignorée. Quelques raies de Ca II et de Ba II ont été identifiées :

Ca II.....	3706,0 Å
»	3736,9
»	3933,6
Ba II.....	4554,0

Ceci correspond aux observations d'ORNSTEIN et de RYDE déjà citées. Ces raies ont été observées au régime moyen de 60 A, et se trouvent plus ou moins renforcées par la surintensité.

Les groupes de bandes de la molécule C₂ repérées vers les longueurs d'onde 4700 et 5100 Å expliquent bien la présence des vagues sur les diagrammes d'énergie. Le groupe 5550-5600 ne se traduit pas par une vague nette parce qu'il est moins intense, mais on le voit sur le diagramme correspondant à l'arc sifflant (fig. 48).

Il est intéressant de remarquer que le spectre de la comète de BROOKS comporte les trois mêmes groupes de radiations intenses que l'arc sifflant. K. WURM dans *Handbuch der Astrophysik* (suppl. 1936, t. 3, p. 7305) signale ces groupes dont les têtes se situent respectivement à 4737 Å (très intense), 5165 Å (un peu moins intense), 5635 Å (moins intense). L'ordre des intensités est en gros le même que dans les spectres d'arc.

Les bandes intenses dont je viens de souligner l'existence sont donc communes à tous les arcs intensifs entre charbons, que ces derniers soient minéralisés ou non. Comme le rayonnement du fond du cratère est également commun à tous ces arcs, on s'explique que la lumière émise par le cratère des arcs intensifs ait une teinte dépendant peu de la minéralisation et de dominante bleu vert. Même avec une minéralisation de fluorure de calcium, j'ai mentionné que lorsque l'effet BECK se produisait sporadiquement, on voyait une luminescence bleue très vive dans le cratère, et l'étude spectrale a montré que les bandes dues à C₂ en sont la cause.

Les études de FINKELNBURG et SCHLUGE ont montré que la surcharge d'un charbon homogène est accompagnée d'une augmentation de brillance, laquelle peut atteindre 40 000 sb, la brillance du plasma gazeux y participant pour 16 000 sb. Ces caractères communs de la haute brillance et d'émission intense de bandes de la molécule C₂ dans les régions 4700 et 5100 Å rapprochent les arcs intensifs entre charbons minéralisés et charbons techniquement purs. Le caractère de l'arc minéralisé et sa supériorité résident dans sa stabilité.

Le fond continu qui apparaît sous les nombreuses raies de l'arc intensif est, d'après plusieurs auteurs, dont PHERSON [52] et FINKELNBURG et SCHLUGE, partie dû à l'émis-

sion du cratère, partie dû à celle du plasma. FINKELNBURG et SCHLUGE expliquent l'existence de spectres continus dans les décharges d'étincelles et d'arc par le freinage des électrons dans le champ des ions positifs (transitions libre-libre), et même par des recombinaisons (libre-lié) où des énergies de toutes valeurs peuvent être rayonnées [39], [29]. Lorsque la brillance augmente par suite d'un accroissement de l'intensité électrique, l'émission du fond continu et celles des raies s'accroissent. PHERSON attribue surtout l'augmentation de lumière à l'élargissement des raies. Ce fait a été signalé par de nombreux auteurs dont MANNKOPF [63]. La surcharge de 65 à 100 A sur les charbons de Φ 8 minéralisés au calcium n'a permis d'observer l'élargissement des raies de Ca I qu'aux environs de 3 600 Å. Par contre, la surcharge renforçait fortement le fond continu du spectre, et l'on est porté à croire que ce renforcement a sa naissance dans les vapeurs plutôt que sur le fond solide du carbone.

Paul PROISY [53] a étudié l'élargissement des raies sur des charbons minéralisés au fluorure de calcium, et a chiffré les parts d'augmentation provenant respectivement de l'élargissement des raies et du fond continu. Par exemple, pour un charbon de 16 mm de diamètre, l'accroissement de la brillance est surtout dû au renforcement du fond continu entre 120 et 170 A, et à l'élargissement des raies du calcium au-dessus de 170 A. On connaît quatre causes d'élargissement des raies : effet Döppler-Fizeau, effet STARK, effet de choc, effet d'absorption. Les deux dernières causes sont les plus probables dans le cas de l'arc intensif, car la concentration des vapeurs anodiques croît fortement avec l'intensité. PHERSON se prononce pour un effet d'absorption.

Température de l'arc intensif. — Rohloff [16] a mesuré la température de la pointe de flammes d'arcs intensifs en y faisant fondre des fils métalliques très fins, et a trouvé 3 800° K. En se basant sur la vitesse des vapeurs s'échappant du cratère, laquelle décroît jusqu'à la pointe de la flamme, il a calculé des températures de 6 000 à 9 000° K aux environs immédiats du cratère. HÖCKER et FINKELNBURG [32] ont calculé la température régnant dans le centre de la veine contractée en partant de l'équation d'ELENBAAS et ont trouvé 11 000° K. La détermination de la température à partir de la distribution d'énergie dans les bandes de C_2 et de CN, effectuée par plusieurs auteurs sur l'arc non minéralisé, ne semble pas avoir été appliquée à l'arc intensif. KIZEL⁽¹⁾ a mesuré les rapports d'intensités de certaines raies spectrales de Mg^+ et de Mg, de La^+ et de La, pour calculer le degré d'ionisation. FINKELNBURG [88] a utilisé ces données pour vérifier les valeurs qu'il avait trouvées avec SCHLUGE à partir de l'énergie rayonnée. La concordance a été bonne, mais on peut remarquer que toutes les mesures intéressant la température des masses gazeuses ont des bases théoriques assez imprécises.

FINKELNBURG et SCHLUGE se sont basés sur des mesures d'énergie rayonnée. Ils ont d'une part mesuré le rayonnement total en le recueillant sur une pile thermo-électrique [44 *ter*] ou dans un calorimètre [47]. D'autre part, ils ont relevé la courbe de distribution énergétique entre 3 500 et 12 000 Å [10].

La formule de STEFAN-BOLTZMANN a été appliquée par ces auteurs au rayonnement total et au rayonnement 3 500-12 000, en modifiant la formule dans ce dernier cas. Ils ont alors obtenu la température de radiation, évidemment très inférieure à la tem-

(1) KIZEL, *Journ. Techn. phys.*, Léninegrad, 9, 1939, p. 2023.

pérature vraie, puisque le pouvoir émissif des vapeurs anodiques est certainement bas, et de base discutable, le spectre étant composé d'un fond continu auquel un spectre de raies beaucoup plus intenses est superposé.

FINKELNBURG et SCHLUGE, remarquant que la courbe d'énergie 3500-12000 Å obéit

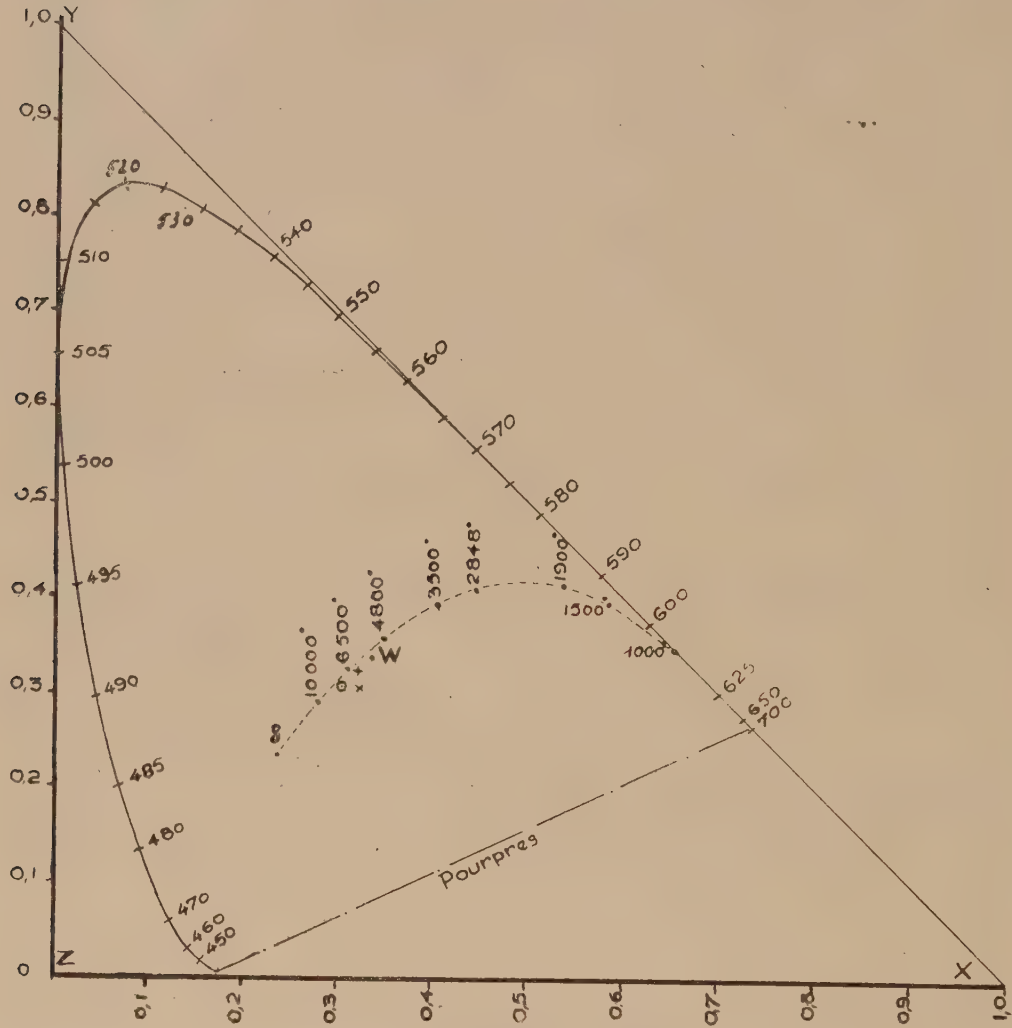


Fig. 49. — Triangle des couleurs.

× qualité Orlux 550 + qualité Orlux 550-01 ⊙ qualité 552.

à la formule de PLANCK, ont estimé pouvoir appliquer la formule de WIEN, et ont ainsi obtenu une température de distribution. Partant de cette température, ils ont alors calculé le rayonnement théorique par la formule de STEFAN BOLTZMANN, ce qui leur a permis de déterminer un coefficient d'absorption. Ce coefficient, de l'ordre de 0,3 à 0,4 suivant la densité de courant, correspond à une évaluation du « degré de rem-

plissage » du spectre faite par les mêmes auteurs; introduit dans la formule de STEFAN BOLTZMANN, il leur a enfin permis de corriger la température de radiation trouvée à partir du rayonnement total. Voici les valeurs obtenues :

	Anodes Φ 7 mm	
	Températures ($^{\circ}$ K)	
	à 50 A.	à 75 V.
Température de radiation trouvée en appliquant la formule de STEFAN BOLTZMANN au rayonnement total	4360	5100
Température de radiation trouvée en appliquant la formule de STEFAN BOLTZMANN au rayonnement 3500-12000 Å (formule adaptée à ce rayonnement).	4330	4930
Température de distribution trouvée en appliquant la loi de WIEN au rayonnement 3500-12000 Å.....	5600	6060
Température vraie trouvée en appliquant la formule de STEFAN BOLTZMANN au rayonnement total. Compte tenu du coefficient d'absorption.....	5720	6330
Coefficient d'absorption moyen.....	0,32	0,42

Dans l'Ouvrage publié en 1948 [88], FINKELNBURG adopte 5600 $^{\circ}$ K et 6000 $^{\circ}$ K, les coefficients respectifs étant 0,35 et 0,42.

La mesure directe de la température de couleur a été faite avec un appareil EASTMANN (Eastmann temperature color meter) sur la lumière émise par un charbon qualité Orlux 550 (à mèche dure) supportant 150 A. Le chiffre trouvé a été de 5000 $^{\circ}$ K.

Par spectrophotométrie, j'ai dit que nous déterminions les coordonnées X, Y, et Z dans le système international. La figure 49 montre quelques points ainsi obtenus :

- Charbon à mèche dure volatilité faible (qualité 550).
- Charbon à mèche duré volatilité moyenne (qualité 550-01).
- Charbon à mèche molle volatilité moyenne (qualité 552).

Le point C est calculé à partir de la courbe énergétique n $^{\circ}$ 1 de la figure 46. On remarque que ces points sont situés près du point W représentant le spectre d'égale énergie, et dont la couleur correspondante est le blanc légèrement pourpre.

L'énergie rayonnée par le cratère de l'arc intensif est considérable, puisqu'elle peut atteindre 6000 W : cm 2 [88]. C'est donc une source de choix pour la réalisation de hautes températures. En recueillant son rayonnement et en le concentrant, il est possible de réaliser une très grande densité d'énergie. On peut ainsi obtenir des températures très élevées, en s'affranchissant des influences du carbone et du milieu dans lequel l'arc est entretenu.



CHAPITRE VII.

MÉCANISME DE L'EFFET BECK.

Après avoir exposé les faits constatés ou extraits des travaux publiés, il convient de les utiliser pour essayer de comprendre le mécanisme de l'effet BECK.

Le fait de minéraliser la mèche d'un charbon supportant de faibles densités de courant augmente fortement la conductibilité de l'arc. Les vapeurs minérales émises alors par la mèche s'échauffent en traversant la zone de chute anodique et fournissent des porteurs par ionisation. La brillance du cratère est abaissée, car la vaporisation et l'ionisation absorbent de l'énergie et contribuent ainsi à diminuer la température de l'arc, et ceci d'autant plus que les matières de la mèche sont plus volatiles ou plus ionisables.

En augmentant la densité de courant, on accroît la vaporisation, et la conductibilité devrait augmenter, c'est ce qu'on constate jusqu'à un certain point, puis la conductibilité décroît, et les vapeurs anodiques se mettent à rayonner intensément. Il est établi que ce surcroît de rayonnement est dû à une élévation de la température des vapeurs. FINKELNBURG et SCHLUGE l'ont vérifié par plusieurs voies : application de la loi de STEFAN au rayonnement total, observation du déplacement du λ maximum, évolution du Farbindex.

L'augmentation de la température des vapeurs est due à un accroissement surabondant d'énergie causé par une élévation de la chute anodique dont il reste à expliquer l'origine. La relation entre la chute anodique et le volume des vapeurs sortant de l'anode est frappante. FINKELNBURG et SCHLUGE, dans leur remarquable suite de travaux sur l'arc intensif [72], ont émis une théorie sur l'origine de la chute anodique, d'après laquelle le surcroît de chute de tension accompagnant l'effet Beck est lié à la vaporisation des matières de l'anode. Pour y parvenir, ils établissent le bilan énergétique de la partie anodique de l'Arc [44 *ter*) :

Soient :

J_e , l'intensité électronique affluant à l'anode;
 V_e , la chute anodique;
 V_{au} , le travail d'extraction d'un électron.

Les pertes par conductibilité et convection sont négligées. Dans le cas d'un charbon

basse intensité non minéralisé, l'énergie est rayonnée par le cratère, on peut écrire l'égalité

$$J_e(V_{au} + V_a) = \pi r^2 \sigma \epsilon T^4;$$

σ , constante STEFAN BOLTZMANN;
 T , température absolue du cratère;
 ϵ , pouvoir émissif.

Dans le cas d'un charbon minéralisé intensif, le rayonnement dépend du volume de l'arc, et l'énergie apportée doit en plus servir à vaporiser la matière de l'anode. Si Q est l'énergie de vaporisation de la matière de l'anode, T_s la température absolue des gaz de l'anode, F le volume de la partie anodique, on a

$$J_e(V_{au} + V_a) = F \sigma T_s^4 + Q.$$

Les auteurs calculent qu'en ordre de grandeur la chute anodique supplémentaire est de l'ordre de 10 V, ce qui est en bon accord avec l'expérience.

Dans un travail ultérieur [22] ils reprennent le bilan. L'énergie apportée par seconde à l'anode (en négligeant toujours les pertes de chaleur par conductibilité, convection, rayonnement, qui sont faibles) doit servir à vaporiser les matières anodiques, échauffer les vapeurs qui en résultent, et causer leur expansion (10^6 fois). Cette énergie sera ensuite rayonnée pour sa plus grande part.

Si A est la quantité de matières vaporisées par seconde à l'anode, laquelle dépend du courant, Q l'énergie de vaporisation d'échauffement et d'expansion, on peut écrire

$$J_e(V_{au} + V_a) = AQ, \quad \text{d'où} \quad V_a = \frac{AQ}{J_e} - V_{au}.$$

Les auteurs ont déterminé expérimentalement l'allure des lois de variation de Q et de A en fonction de J , d'une part dans le cas d'un charbon homogène, d'autre part dans le cas d'un charbon à mèche minéralisée, et ont trouvé :

Charbon homogène	$Q = KJ, \quad A = KJ^2$
Charbon à mèche.....	Q entre KJ et KJ^2 , A sensiblement égal à KJ^3

V devrait donc varier plus vite que linéairement avec J dans le premier cas, et plus vite que suivant le carré de J dans le second cas. Expérimentalement, ils trouvent que dans les deux cas, V_a varie comme des puissances intermédiaires entre les puissances 1 et 2 de J , mais que la variation est beaucoup plus forte dans le cas du charbon homogène. La vérification n'est donc que qualitative.

Enfin, dans un troisième travail [35], FINKELNBURG et SCHLUGE introduisent de nouvelles valeurs :

W , chaleur perdue par conductibilité thermique, convection, rayonnement, qu'ils estiment à 700 W pour le charbon minéralisé de diamètre 7 mm.

A_0 usure par combustion, admise comme étant indépendante de l'intensité. Elle est obtenue en extrapolant pour $J = 0$ des courbes d'usure relevées en fonction de l'intensité J . La valeur est de 0,2 mm : s, ou $1,2 \cdot 10^{-3}$ g : s pour les charbons Ringsdorf Φ 7 mm considérés.

Le bilan s'exprime alors de la façon suivante :

$$J_e(V_a + V_{au}) = W_n + (A - A_0)Q.$$

J_e est estimé égal à J , c'est-à-dire que tout le courant est supposé transporté par les électrons. V_{au} est chiffré à 4,5 V pour la température de 4 000°, A est mesuré expérimentalement. Q peut donc être calculé, FINKELNBURG et SCHLUGE donnent les résultats de ce calcul pour trois qualités de charbons intensifs RINGSDORFF de Φ 7 mm et des intensités de courant variant de 30 à 100 A. Or, les valeurs de Q sont constantes à moins de 7 % près pour chaque charbon. La théorie reliant la chute de tension accompagnant l'effet BECK à la vaporisation de la matière anodique est donc vraisemblable, mais les causes de l'augmentation de la chute de tension restent à trouver.

La corrélation entre le volume des vapeurs anodiques et la chute de tension fait supposer que ces vapeurs sont le siège d'une chute importante de potentiel. FINKELNBURG et SCHLUGE, opérant avec une sonde de 4 mm de diamètre dans le cratère d'un charbon de 7 mm de diamètre, n'ont pas trouvé de chute de potentiel sensible dans ces vapeurs [22]. J'ai cependant repris l'expérience à une autre échelle. L'anode, de qualité Orlux 550 diamètre 16 mm, supportait 180 A. La tension d'arc étant de 80 V. La sonde était constituée par une baguette de charbon de 3 mm de diamètre, et les différences de potentiel par rapport à l'anode étaient relevées à l'aide d'un voltmètre de 600 Ω de résistance intérieure.

J'ai ainsi enregistré dans l'axe du cratère des potentiels rapportés à l'anode de — 44 V à la limite de la masse de vapeurs anodiques, — 40 V au ras du cratère à 2,5 mm du premier point, et — 35 V à environ 2 mm dans l'intérieur du cratère. Le potentiel augmentait encore en enfonçant l'anode vers le fond du cratère. Les valeurs se retrouvaient à 1 ou 2 V près. Les perturbations apportées par une sonde dans le plasma d'un arc sont bien connues. Dans les conditions de mon expérience, la sonde s'effilait très rapidement et se trouvait réduite à une mince aiguille, de sorte que son influence thermique était faible; les perturbations d'ordre électrique que sa présence pouvait apporter dans l'arc restaient cependant entières. L'aspect de l'arc n'était pas modifié. Quelles que soient les erreurs dues au procédé, j'estime que les chiffres relevés sont exacts en valeurs relatives, et qu'ils indiquent l'existence d'une chute de potentiel importante dans la masse de vapeurs anodiques. La chute anodique globale serait donc composée de la chute au contact de l'anode, et d'une chute dans la masse des vapeurs.

La chute anodique totale subit un accroissement brusque lorsque le jet de vapeurs apparaît, et elle s'accroît encore en fonction de leur volume apparent. Il est possible que la chute vraie s'accroisse également; à ce sujet, HAGENBACH a constaté que plus l'anode est chaude plus la chute anodique est forte [75, p. 615], mais tout se passe apparemment comme si l'accroissement avait surtout lieu dans les vapeurs. Leur présence en petite quantité dans l'arc augmenterait donc tout d'abord la conductibilité de ce dernier par multiplication du nombre de porteurs, puis la concentration des vapeurs augmentant, la probabilité des chocs entre particules, électrons, atomes neutres, atomes excités, atomes ionisés, deviendrait de plus en plus grande. Ceci expliquerait qu'à partir d'une certaine concentration des vapeurs la multiplication des chocs y produise une chute de potentiel; il en résulterait un échange accru d'énergie, dont une partie serait rayonnée sous forme de lumière par les processus classiques.

Ces explications sont hypothétiques. En ce qui concerne l'effet de la vaporisation sur la chute anodique proprement dite, il faudrait déjà que l'existence de cette dernière fût expliquée. Les auteurs sont peu précis sur ce point, et les recherches bibliographiques sont plutôt décevantes. On admet souvent que la chute est due à une charge spatiale négative causée par les électrons affluents, et les électrons émis par l'anode même, grâce à l'émission thermionique dont elle doit être le siège, ceci notamment d'après HAGENBACH [38, p. 627]. On ne croit généralement pas qu'il y ait émission d'ions positifs par l'anode; ces derniers seraient produits par ionisation des atomes sous l'influence de la température (loi de SAHA) plutôt que par choc d'électrons. Ceux-ci ne sont pas en effet suffisamment accélérés, et l'ionisation ne pourrait avoir lieu que par chocs cumulatifs, ce qui est moins probable. Le sujet nécessite encore de nombreuses et importantes recherches.



RÉSUMÉ GÉNÉRAL.

L'arc électrique entre électrodes de carbone constitue une source de lumière dont les principales caractéristiques sont une brillance élevée, un rayonnement de composition spectrale voisin de celui de la lumière solaire, et la possibilité de mettre en jeu de fortes puissances. Un gros progrès a été fait il y a une trentaine d'années à la suite de la découverte de BECK. Grâce à une forte minéralisation de l'anode en sels de terres rares on put alors augmenter la densité de courant dans l'anode et obtenir en régime stable des brillances trois à six fois celle du charbon pur.

C'est cette forme particulière, dite arc intensif, qui fait l'objet de mon étude.

La bibliographie de langue française est ancienne ou insuffisante. J'ai donc estimé préférable de rappeler les travaux antérieurs, afin de bien situer mes apports. Mes recherches, poursuivies depuis 1927, sont restées inédites. La plupart ont été effectuées en commun avec mes collaborateurs, certaines me sont personnelles, parmi lesquelles la réalisation d'électrodes nouvelles pour arcs intensifs, exemptes de terres rares, et donnant cependant lieu à un effet BECK spontané et stable (cinquième Chapitre).

Le premier Chapitre est une introduction générale. Après les définitions, je passe en revue les connaissances sur l'arc électrique entre baguettes de carbone plus ou moins minéralisées. La minéralisation de l'anode, la densité de courant dans cette dernière, permettent de passer de l'arc au carbone à l'arc à flamme éclairante intensif ou non. Je décris sommairement les différents types d'arc que je considère comme caractéristiques, afin de bien situer la question. La littérature existante sur ces sujets est en effet peu précise.

Mon but principal étant de réaliser des électrodes pour l'éclairage, j'insiste dès le Chapitre II, sur les moyens de mesures et d'analyses de la lumière émise par l'arc intensif. Des dispositifs enregistreurs de la lumière et de la brillance ont été réalisés sous mon impulsion. Les méthodes ainsi mises au point, et pour certaines d'entre elles en liaison confiante et efficace avec des laboratoires d'État, ont été adoptées officiellement par nos administrations.

La nécessité de connaître la distribution de l'énergie lumineuse en fonction de la longueur d'onde se faisait fortement sentir depuis l'apparition du film en couleur. Le problème reçut une solution satisfaisante avec la construction d'un spectrophotomètre à fonctionnement automatique, inscrivant la courbe d'intensité énergétique sur un diagramme photographique, dont les abscisses sont proportionnelles aux longueurs d'ondes. Toutes les corrections sont réalisées automatiquement par l'appareil qui est simple, robuste et véritablement industriel.

Le mécanisme physique de l'arc intensif était mal connu; certaines assertions publiées à l'étranger se sont révélées inexactes. J'ai donc entrepris cette étude en séparant avec soin les effets anodiques et cathodiques. L'arc s'amorce sur une zone chaude et émissive

de la pointe négative; en accroissant peu à peu l'intensité du courant, la flamme cathodique se contracte dès qu'on dépasse 80 A, quels que soient les types d'arcs et d'électrodes. J'ai découvert qu'on peut provoquer à volonté cette contraction à des intensités de courant voisines de 40 A, en dirigeant des courants gazeux convenables par rapport à l'arc.

Le fonctionnement régulier de l'arc intensif est souvent perturbé par des dépôts de carbures des métaux cériques sur la pointe cathodique. J'ai mis au point un procédé pour empêcher ou limiter ces dépôts de façon à maintenir la stabilité de l'arc.

Mes études m'ont amené à voir dans l'arc intensif un phénomène presque exclusivement anodique. Cette conclusion simple a nécessité de longues recherches, résumées au Chapitre IV, et relatives aux facteurs internes et externes. J'ai montré que la brillance élevée du cratère anodique ne dépend pas de la profondeur de ce cratère mais seulement de la densité locale d'énergie; de même, la formation de carbures des métaux cériques n'est pas la cause de la lumière intense émise, ceci en contradiction avec la théorie de BASSETT.

J'en donne une preuve particulière au Chapitre V. Dès 1934, j'avais constaté la possibilité de réaliser des anodes à effet BECK stable et spontané, en les minéralisant avec divers éléments, dont certains incapables de se carburer, le cuivre par exemple. Des anodes minéralisées avec des métaux de transition tel que le fer, en associant ces métaux à des quantités réduites de terres rares, avaient été essayées avec succès et protégées par des brevets.

Grâce à ces recherches, notre pays privé de tous approvisionnements en terres cériques pendant l'occupation, a pu employer des anodes fonctionnant de façon stable et efficace, dont plusieurs millions ont été alors fabriquées et utilisées. J'ai encore établi le rôle important, mais ignoré, de la conductibilité calorifique radiale des anodes. Avec certains minéralisants, on obtient ou non l'effet BECK sous un même régime d'arc, suivant que l'écorce en carbone de ces anodes est thermiquement plus ou moins isolante.

J'ai pensé aussi que l'étude spectrale de l'arc intensif faciliterait la compréhension de son mécanisme. Le Chapitre VI est donc réservé au rayonnement émis. Les enregistrements spectrophotométriques obtenus avec l'appareil décrit dans le Chapitre II montrent avec netteté l'évolution de la courbe d'énergie quand on passe de l'arc ordinaire à l'arc intensif. Il n'y a pas accroissement proportionnel de toutes les radiations, et l'arc intensif est caractérisé par une émission très forte des molécules C_2 présentes dans les gaz de l'arc. Ces radiations accompagnent l'effet BECK, quelle que soit la minéralisation de l'anode; elles constituent une fraction très importante de l'énergie rayonnante localisée dans la partie bleu vert du spectre.

Le problème de la température de l'arc est lié de façon plus ou moins étroite à l'étude spectrale; toutefois, son intérêt technique est moindre. J'ai estimé que l'importance des travaux étrangers justifiait un résumé de ce sujet (Chap. VII).

Enfin, j'ai esquissé de façon sommaire, le difficile sujet du mécanisme physico-chimique de l'effet BECK. Mon opinion résulte du rapprochement des principaux travaux étrangers et de mes très nombreuses observations personnelles. Plus heureux que beaucoup de mes prédécesseurs, j'ai pu examiner des arcs intensifs dans des conditions physico-chimiques très diverses, et dans bien des cas, nouvelles. Je ne me suis cependant pas permis de conclure de façon catégorique; les recherches se poursuivent avec de nouveaux moyens.

CONCLUSIONS.

La revue des connaissances sur l'arc électrique entre charbons, par laquelle j'ai commencé mon exposé, m'a permis de situer la question, et de distinguer entre les différents types d'arc. Il règne en effet souvent une certaine confusion dans les publications qui s'y rapportent.

J'ai considéré à part les phénomènes cathodiques dont l'influence sur l'effet BECK n'est qu'accessoire; la contraction du plasma, que j'ai pu provoquer à volonté, semble avoir surtout un intérêt théorique.

L'effet BECK est essentiellement d'origine anodique, son mécanisme est le même quelle que soit l'intensité, tout au moins entre 30 et 1 000 A. J'ai donc pu utiliser des résultats se rapportant à des charbons de différentes dimensions convenablement chargés.

La cause de la brillance élevée réside dans la haute température à laquelle les vapeurs anodiques sont portées, ceci indépendamment de la formation d'un cratère, ou de la production possible d'un carbure réfractaire dans l'arc. Tout se passe comme si le courant électrique n'était qu'une cause d'échauffement du charbon solide et des vapeurs anodiques, qui se mettent alors à rayonner; l'excitation de ces dernières semble donc être d'origine thermique.

Ces points essentiels se dégagent de l'étude générale des facteurs internes et externes, dans laquelle j'ai utilisé aussi bien les résultats obtenus dans mon laboratoire que ceux de la littérature. Parmi ces derniers, il convient de signaler les publications de FINKELNBURG et SCHLUGE, qui constituent un ensemble particulièrement remarquable, et les articles de ROHLOFF. PRESTON R. BASSETT a le mérite d'avoir publié le premier travail important sur l'arc intensif.

Quel est l'avenir de l'arc intensif, et dans quel sens doit-on chercher à le perfectionner ?

Les usages actuels de l'arc intensif se cantonnent à peu près exclusivement dans la projection militaire d'une part, et dans l'industrie cinématographique d'autre part. L'administration française des phares et balises utilise des arcs intensifs de 45 kW dans des phares très puissants. Le premier champ d'application est en régression, et l'emploi d'ondes invisibles semble devoir supplanter la lumière pour déceler les buts aériens ou marins.

Dans l'industrie cinématographique, l'arc intensif est utilisé dans les studios et dans les salles de projection. C'est la source de lumière dont la composition convient le mieux à la prise de vue, puisqu'elle se rapproche de celle de la lumière solaire. Les tubes lumineux, la combinaison de lampes à vapeur de mercure à moyenne pression et de lampes à incandescence, permettent d'aboutir à des effets analogues, mais la haute brillance du cratère est très avantageuse pour obtenir des faisceaux intenses et des effets de

contraste. C'est cette propriété qui rend l'arc intensif incomparable pour la projection cinématographique, et, d'autre part, la composition de sa lumière convient aussi bien pour les films noirs et blancs que pour les films en couleurs. La lampe à vapeur de mercure à haute pression pourrait menacer cette position lorsque sa sécurité de fonctionnement sera améliorée, mais la tension électrique élevée nécessaire, l'obligation de refroidir par l'eau, constituent des obstacles sérieux. Enfin, son rayonnement a un spectre moins fourni et manque notamment de rouge.

Le perfectionnement des charbons intensifs doit être recherché dans le sens d'une augmentation de la brillance.

Un progrès de l'ordre de celui qui fut réalisé en passant de l'arc ordinaire à l'arc intensif ne paraît pas probable dans un avenir prochain. L'augmentation de la brillance est facilement obtenue au détriment de la durée des charbons, mais il semble qu'on ne puisse dépasser de beaucoup les vitesses d'usure actuelles, tout au moins tant que les charbons seront rigides et rectilignes. On peut remarquer que les vapeurs de terres rares rayonnent pendant très peu de temps dans le cratère avant de s'échapper, en emportant de l'énergie sous forme de chaleur; il est donc intéressant de chercher à augmenter la durée de leur rayonnement.



REMERCIEMENTS.

Je remercie M. le Professeur E. DARMOIS pour la bienveillance avec laquelle il a accueilli mon travail et pour les avis qu'il m'a donnés.

J'exprime ma reconnaissance à M. OSWALD, Directeur scientifique de la Société « Le Carbone-Lorraine », sous les ordres duquel j'ai fait des recherches sur les arcs depuis 19 ans, pour les enseignements et les encouragements qu'il m'a prodigués au cours de ma carrière. Conformément à son désir, je l'ai peu cité au cours de mon exposé, mais son apport personnel dans le perfectionnement de nos charbons d'arc est considérable, et j'ai profité largement de ses idées, de sa vaste culture, et de la documentation qu'il a rassemblée.

Je dois citer de même : MM. GRAVIER, CHEDEVILLE, MONCHALIN, les Directeurs de la Société Le Carbone-Lorraine, en particulier M. MORISSET, les Directeurs de l'Usine de Pagny-sur-Moselle, pour l'impulsion qu'ils ont donnée aux recherches et les moyens mis à la disposition du Laboratoire, M. SUQUET; MM. les Professeurs FABRY, FLEURY, BOUTRY et GILLOD pour les conseils éclairés qu'ils ont donnés; M. RIVIÈRE et les Membres de la Commission d'Études pratiques d'Optique et de Télémétrie, les Établissements BARBIER, BÉNARD et TURENNE, BRÉGUET, SAUTTER-HARLÉ pour leur collaboration au perfectionnement des charbons d'arc.

J'adresse mon souvenir reconnaissant à M. DESAVELLE, mon prédécesseur au Laboratoire de Pagny-sur-Moselle, qui m'a initié libéralement à la technique du charbon d'arc, et a beaucoup contribué à la création des charbons intensifs.

Je remercie le personnel des Laboratoires de Pagny-sur-Moselle et d'Épinouze, en particulier MM. PERRIN, BAROIN, SONGIS, GAMEL, les ingénieurs, techniciens et ouvriers qui sont ou qui furent mes collaborateurs, pour l'aide qu'ils m'ont apportée, et pour le travail fait en commun avec le meilleur esprit d'équipe.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

1. HELLER, *Revue Technique Phillips*, 4, n° 1, janvier 1939, p. 1-32.
2. J. J. THOMSON, *Conduction of Electricity through gases* (Cambridge Press, 3^e édition, V 2, 1933, p. 596).
3. HAGENBACH, GEIGER et SCHEEL, *Handb. d. Phys.* Springer, Berlin, 6, 1927-IV, p. 342.
4. NOTTINGHAM, *Franck, Inst.*, 206, 1928, p. 43; 208, 1928, p. 191.
5. BLONDEL, *C. R. Acad. sci.*, 175, 1922, p. 13.
6. STOLT, *Ann. de Phys.*, 74, 1924, p. 80; *Zeits. d. Phys.*, 26, 1924, p. 95; 31, 1925, p. 240.
7. GARBARINI, *R. G. E.*, 10, 1921, p. 67; 15, 1921, p. 835.
8. CHANEY, HAMISTER et GLASS, *Trans. Electroch. Soc.*, 67, 1935, p. 201.
9. MONNIG, LUCAS, *Arcos*, 17, 1939, p. 2036.
10. FINKELNBURG et SCHLUGE, *Z. Phys.*, 119, 1942, p. 206.
11. FINKELNBURG, *Phys. Z.*, 41, 1940, p. 559.
12. PODZUS, *Z. f. Phys.*, 115, 1940, p. 651.
13. MAC GREGOR MORRIS, *J. Inst. Electr. Engin.*, 91, 1944, p. 183.
14. M^{me} AYRTON, *The Electric arc* (*The Electrician*, Londres, 1902).
15. MASON, *Phys. Rev.*, 51, 193, p. 28.
16. ROHLOFF, *Reichsb. f. Phys.*, 1, 1944, p. 47.
17. FINKELNBURG et SCHLUGE, *Z. f. Phys.*, 122, 1944, p. 714.
18. LEBLANC fils, *L'arc électrique*, édit. *J. Phys.*, Paris, 1922.
19. PRESTON R. BASSETT, *Trans. of the Am. Electrochem. Soc.*, 44, 1923, p. 153.
20. PATZELT, *Glas und Electrowaerme*, 57, 1944.
21. KALB, *Electr. Eng.*, 8, 1934, p. 1173.
22. FINKELNBURG et SCHLUGE, 114, 1939, p. 743.
23. BLET, *Mesures*, 1945, p. 92, 93, 94 et 95.
24. WALSH, *Photométry*, p. 296.
25. DJOUDAT, *Thèse, édit. Revue d'Optique*, Paris, 1937.
26. COMPTON, *J. of A. I. E. E.*, 11, 1927, p. 1192.
27. SEELIGER, *La décharge à travers les gaz* (*Einführung in die Physik des Gasentladung*, 2^e édit., 1934, Barth, Leipzig).
28. REICH, *Phys. Z.*, 1, 1906, p. 73.
29. FINKELNBURG, *Z. f. Phys.*, 88, 1934, p. 297, 768; 93, 1934, p. 201.
30. RICHARDSON, *Phil. Mag.*, 10, 1905, p. 242.
31. STOLT, *Ann. Phys.*, 74, 1924, p. 82; *Z. Phys.*, 26, 1924, p. 95; 31, 1925, p. 240.
32. HÖCKER et FINKELNBURG, *Naturforschung*, 1, 1946, p. 6.

33. LANGMUIR, *Science*, 58, 1923, p. 290; *Gen. Elec. rev.*, 26, 1923, p. 731.
34. SLEPIAN, *Phys. Rev.*, 1, 1926, p. 407.
35. FINKELBURG, *Z. f. Phys.*, 116, 1940, p. 230.
36. ROHLOFF, *Reichsber. f. Phys.*, 1, 1944, p. 126.
37. HEATLEY et SOANES, *Trans. Elec. Chem. Soc.*, 72, 1937, p. 281.
38. LÖB, *Fundamental process of electric discharge in gases*, J. WILEY et SONS, New-York, 1939.
39. FINKELNBURG et HAHN, *Die naturwiss.*, 1942, p. 168.
40. TONKS, *Phys. Rev.*, 50, 1936, p. 226.
41. *Field information Agency Techc.*, 27, 1947, n° 9, p. 104.
42. *Technique Cinémat.*, 35, 1947, n° 9, p. 1.
43. B. F. 640.052, 11 janvier 1939, add. 49.554, 28 janvier 1939 (U. S. P. 2.185, 396 22 juillet 1939, E. P. 509.291, 3 décembre 1938).
44. FINKELNBURG et SCHLUGE, *Z. f. Phys.*, 112, 1939, p. 305.
- 44 bis. FINKELNBURG et SCHLUGE, *Z. f. Phys.*, 122, 1944, p. 174.
- 44 ter. FINKELNBURG et SCHLUGE, *Z. f. Phys.*, 113, 1939, p. 562.
45. NOTTINGHAM, *Phys. Rev.*, 1, 1926, p. 764.
46. WESTMAN et CLAPSON, *Bull. Electrochem. Soc.*, 1, 1921, p. 10.
47. FINKELNBURG et SCHLUGE, *Z. f. Phys.*, 117, 1941, p. 344.
48. SAHA, *Phil. Mag.*, 40, 1920, p. 472; *Proc. Roy. Soc.*, A-09, 1921, p. 135. *Treatise on Modern Physics* (India Press., Allahabad, 1, 1934, p. 632).
49. WITTE, *Zeits. f. Phys.*, 88, 1900, p. 415.
50. GEHLOFF, *Zeits. f. Techn. Phys.*, 1, 1920, p. 47; 4, 1923, p. 138.
51. TROMBE et FOEX, *Bull. Soc. Chim., France*, 211, 1946, p. 3-4.
52. PHERSON, *J. Appl. Phys.*, 13, 1942, p. 97.
53. Paul PROISY, *Cah. Phys.*, 24, 1944, p. 79.
54. OSWALD, *Nouvelle Classification des Eléments* (Comm. 17, Congrès Chim. Ind., Paris, 1937).
55. Compagnie Lorraine des Charbons pour l'électricité B. F. 727.208, 25 mars 1934, B. F. 797.208, 27 janvier 1935 et add. 40948, 6 août 1943. U. S. P., 2.140.881, 8 janvier 1936.
56. Société Le Carbone-Lorraine, demande B. F. 486.425, 28 décembre 1943.
57. Compagnie Lorraine des Charbons pour l'électricité (B. F. 817.913, 18 mai 1936 E. P. 475.252, 20 avril 1937).
58. Société Le Carbone-Lorraine, B. F. 854.100, 12 décembre 1938.
59. U. S. P. I. 867 P 24, 8 avril 1929, 12 juillet 1932.
60. Société Le Carbone-Lorraine demande B. F. 464.576, 17 janvier 1942, U.S.P. 2.422.038 25 juillet 1945.
61. ORNSTEIN, *Phys. Z.*, 1, 1931, n° 7, p. 517.
62. RYDE, *Proc. of the. Roy. Soc.*, A, 117, 1927, p. 154.
63. MANNKOPF, *Z. f. Phys.*, 86, 1933, p. 161.
64. C. G. SUITS, *Physics.*, 6, 1935, p. 315.
65. C. G. SUITS, *Phys. Rev.*, 55, 1939, p. 198.

66. LOCHTE, HOLTGREVEN et MAECKER, *Zeits. f. Phys.*, 103, 1937, p. 1.
66 bis. KARIAKIN, *Elekritchestvo, U. R. S. S.*, 3, 1946, p. 27.
66-3. ROCHAN-ZAER, *Thèse, Etude de la vaporisation du Carbone*, 1945, Rodsteim, Paris.
66-4. RIBAUD et BEGUÉ, *Température de sublimation du carbone sous pression (C. R. Acad. sci.*, 221, 1945, p. 73).

Ouvrages consultés.

67. E. DARMOIS, *l'Eclairage*, Gauthier-Villars, Masson, Paris, 1923.
68. E. DARMOIS, *l'Electron*, Presses Universitaires de France, Paris, 1947.
69. DARMOIS et COHU, *Lampes à incandescence et Lampes à décharges (Mém. Sc. Phys.*, 45, 1941).
70. EGGERT et HOCK, *Traité de Chimie Physique*, Dunod, Paris, 1946.
71. FABRY, *Introduction générale à la Photométrie*, 1927, édit. *Revue d'Optique*, Paris.
72. FINKELNBURG et SCHLUGE, *Untersuchung Ueber Hochstromkohlebogen (Zeits. f. Phys.*, 112, 1939, 305; 113, 1939, 562; 114, 1939, 734; 116, 1940, 214; 117, 1941, 344, 119, 1942, 206; 122, 1944, p. 214).
73. M. LEBLANC fils, *L'Arc électrique*, édit. *J. Phys.*, Paris, 1922.
74. M. LEBLANC et M. LEBLANC fils, *La décharge électrique*, Bailliére, Paris, 1929.
75. LOEB, *Fond. proces. of Electr. Discharge in Gases*, 1939, WILEY et SONS, New-York, Chapman et Hall, London.
76. OSWALD, *Quelques nouveautés en matières de charbons pour l'électricité (8^e Congrès Chim. Ind. Paris*, 1928).
77. PHERSON, *The radiation from Carbon Arcs (J. Appl. Phys.*, 13, 1942, p. 97).
78. REY, *De la portée des projecteurs électriques*, Berger-Levrault, Paris, 1915.
79. SEELIGER, *Einführung in die Physik des Gasentladung*, 2^e édit., 1934, Barth, Leipzig.
80. ZELLNER, *Die künstlichen Kohlen*, 1903, Springer, Berlin.
81. N. BRODE, *Spectroscopy*, Wiley et Sons, 3^e édit., 1946.
82. J. D. COBINE, *Gaseous Conductors*, Mc Grow Hill boock C°, 1941.
83. K. ARNDT, *Die künstlichen Kohlen*, 1932, Springer, Berlin.
84. BLANC, *Rayonnement*, 1921, Coll. Armand Colin, Paris.
85. COTTON, *Electric Discharge Lamps*, 1946, Chapman et Hall, Londres.
86. RIBAUD, *Traité de pyrométrie optique*, 1931, Edit. *Rev. Optique*, Paris.
87. TEMPÉRATURE, *Its measurement and control in science and Industry*, 1941, Rheinhold pub. corp. New-York.
88. FINKELNBURG, *Hochstrom Kohlebogen*, 1948. Springer, Berlin.
89. RIBAUD, *Mesure des températures*, 1936, Coll. Armand Colin, Paris.
90. FLEURY, *étalons photométriques*, édit. *Revue Optique*, Paris 1932.
91. *Fours électriques et Chimie*, Lebeau, Presses universitaires de France 1924. Nouvelle édition, *Les hautes températures en Chimie*, sous presse, Masson, Paris, 1950. En particulier : Chapitre XI, *L'arc électrique intensif*, par M. OSWALD, pages 538 à 553.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
PRÉFACE	V
INTRODUCTION.....	1
Définition de l'arc électrique.....	2
Technique de fabrication des charbons d'arc.....	3
Définition des termes techniques.....	4
 CHAPITRE I. — <i>Description des arcs employés par la technique</i>	 5
I. — <i>Arc classique entre charbons</i>	5
II. — <i>Arc entre charbons minéralisés dits arc à flamme</i>	12
III. — <i>Arc intensif 150 A/75 V</i>	12
Protection des charbons contre la combustion.....	13
Rotation du charbon positif.....	13
Disposition relative des charbons.....	13
Réglage de l'arc.....	14
Alimentation de l'arc.....	15
Aspect de l'arc. Impact.....	15
Importance des charbons.....	19
Résultats obtenus avec l'arc 150 A/75 V.....	20
Caractères de l'arc intensif.....	21
IV. — <i>Arc intensif à intensité inférieure ou égale à 80 A</i>	21
V. — <i>Arc intensif avec courant alternatif</i>	24
 CHAPITRE II. — <i>Appréciation de la lumière émise par un arc</i>	 27
I. — <i>Stabilité dans le temps</i>	27
II. — <i>Quantité et qualité de la lumière</i>	28
III. — <i>Rendement</i>	29
IV. — <i>Photométrie</i>	30
Principe.....	30
Mise en œuvre.....	31
Mesure de la brillance de la surface du cratère.....	33
Enregistrement des courbes de brillance.....	33
V. — <i>Spectrophotométrie</i>	35
Procédé photographique.....	35
Procédé par mesure directe d'énergie.....	35
Enregistrement automatique de la courbe d'énergie.....	35
Utilisation des résultats.....	38
 CHAPITRE III. — <i>Phénomènes cathodiques</i>	 41
I. — <i>Généralités</i>	41
II. — <i>Description des phénomènes</i>	42
III. — <i>Établissement artificiel du dard</i>	44

	Pages.
IV. — <i>Données pratiques</i>	45
V. — <i>Perturbations dues à la partie anodique de l'arc</i>	46
VI. — <i>Influences extérieures</i>	46
CHAPITRE IV. — <i>Phénomènes anodiques</i>	49
I. — <i>Généralités</i>	49
II. — <i>Influences extérieures aux charbons. Intensité du courant</i>	52
Positions relatives des charbons.....	55
Influences hydrodynamiques.....	57
Influences magnétiques.....	60
Tension.....	60
III. — <i>Charbon anodique</i>	63
Effet BECK.....	63
Cratère.....	64
Vapeurs anodiques.....	65
Existence d'une pression dans le cratère.....	66
Soufflage dans le cratère.....	66
Influence de l'écorce.....	68
Influence de la mèche.....	69
Minéralisation de la mèche.....	73
Adjonction de corps peu ou pas générateurs de lumière.....	75
CHAPITRE V. — <i>Obtention de l'effet Beck avec des éléments autres que des terres rares</i>	83
Carbure de Silicium.....	83
Métaux.....	84
Fluorures alcalino-terreux.....	86
Dilution des sels de cérium.....	86
Composés réfractaires métalliques non oxygénés.....	86
Thorium.....	86
Artifices pour fluorures alcalino-terreux.....	88
Applications.....	90
Emploi du tableau de classement périodique dans les recherches sur les arcs.....	93
CHAPITRE VI. — <i>Étude spectrale du rayonnement. Température</i>	95
Température de l'arc intensif.....	99
CHAPITRE VII. — <i>Mécanisme de l'effet BECK</i>	103
RÉSUMÉ.....	107
CONCLUSION.....	109
REMERCIEMENTS.....	111
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	112
TABLE DES MATIÈRES.....	115



DEUXIÈME THÈSE



PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ



Les fabrications modernes de noir de fumée.



Vu et approuvé :

Paris, le 31 mars 1949.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,
A. CHÂTELET.

Vu et permis d'imprimer :

LE RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,
JEAN SARRAILH.





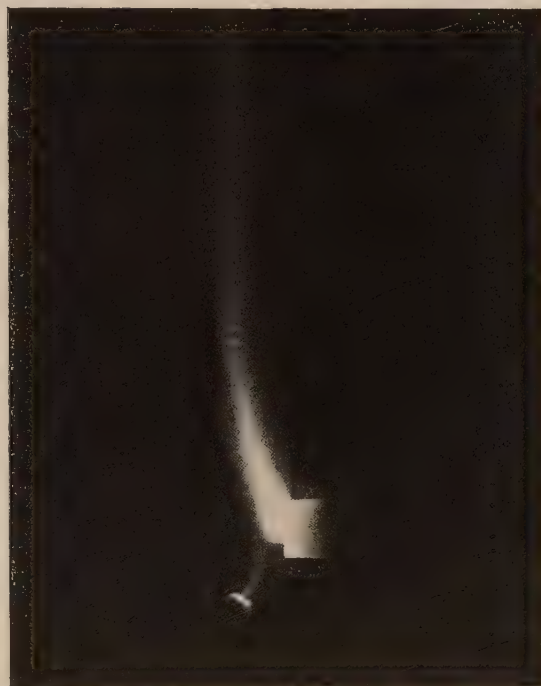
80 A.



125 A.



150 A.



175 A.

Fig. 7. — Aspects de l'Arc intensif. Charbon positif Orlux 550 Φ 16 mm. Charbon négatif Orlux 555 Φ 11 mm.

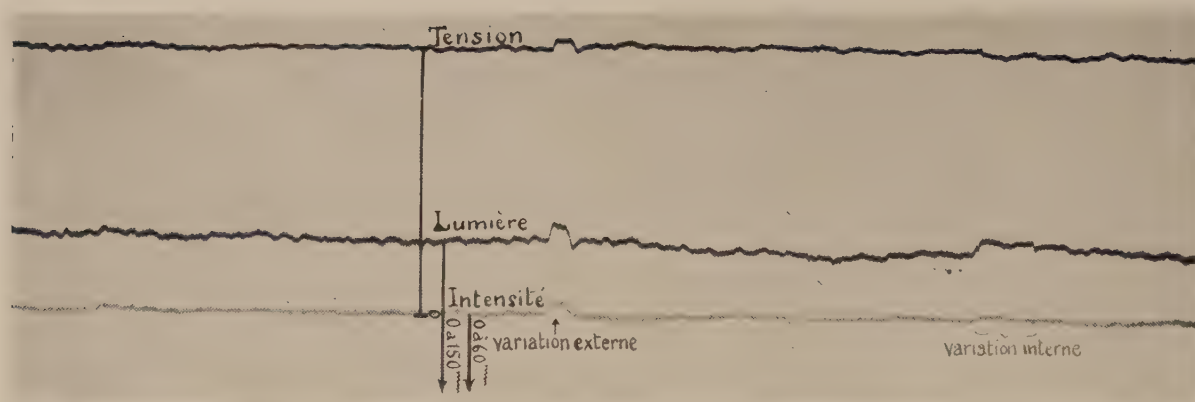
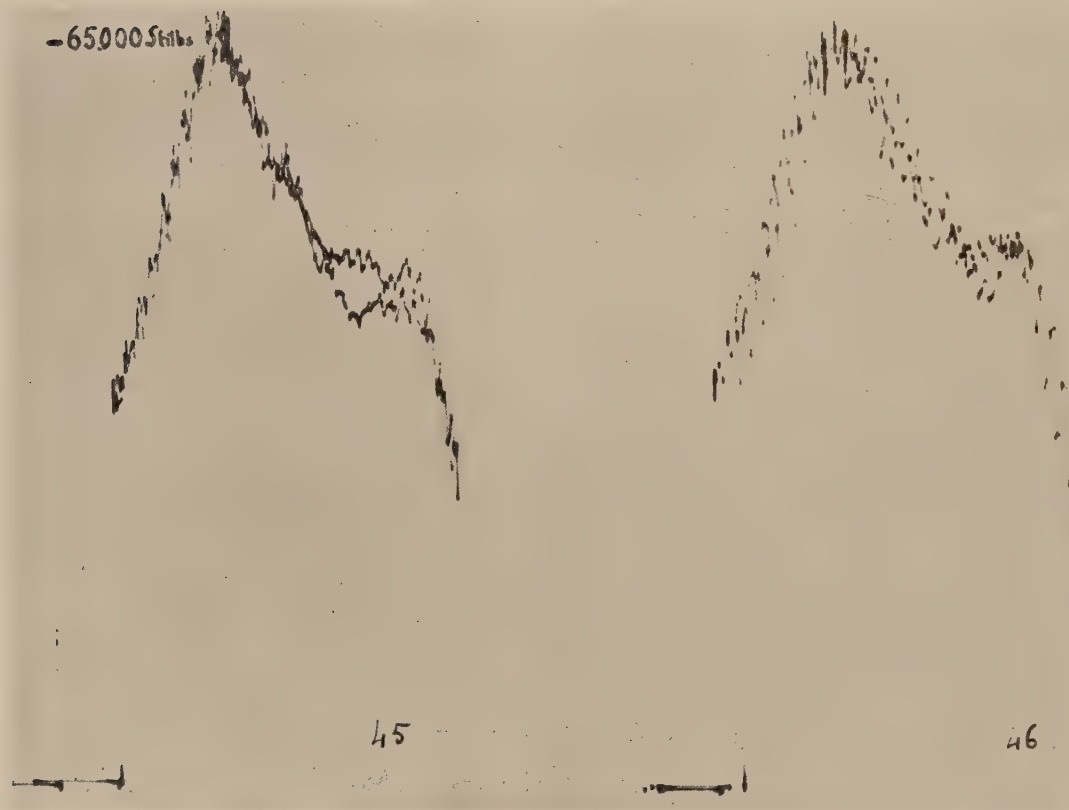


Fig. 18.

Fig. 23. — Charbon 550-01 Φ 16 mm.Angle 45° . Impact o. 145 A/75 V.Courbes de brillances n^o 45 et 46 : B. M. 65 000 sb.

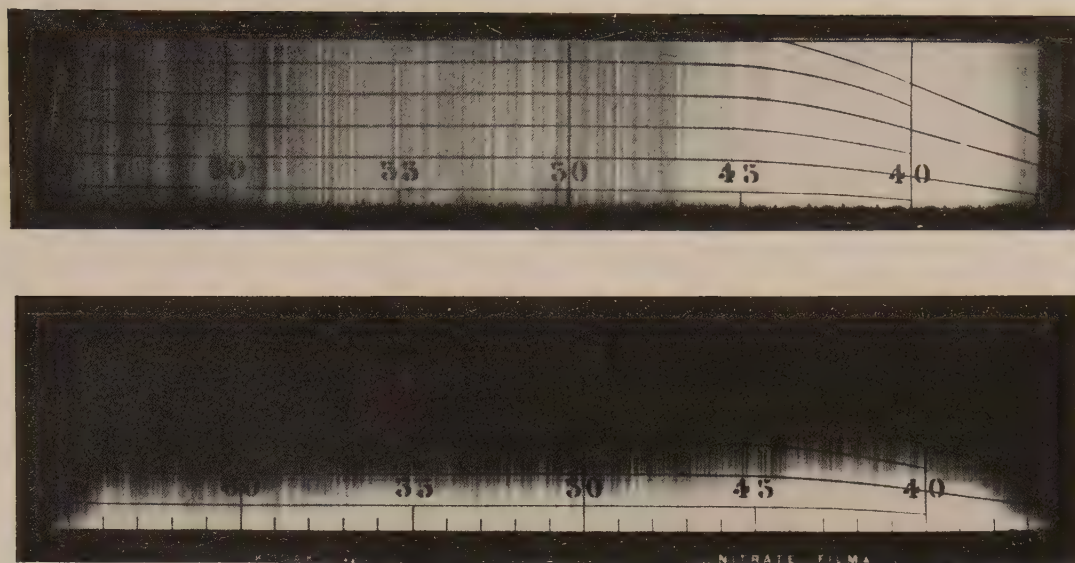


Fig. 24. — Spectrogrammes de charbon 554 Φ 8 mm, 40 A.

1078. Spectre normal.

1079. Spectre avec coin dégradé interposé.

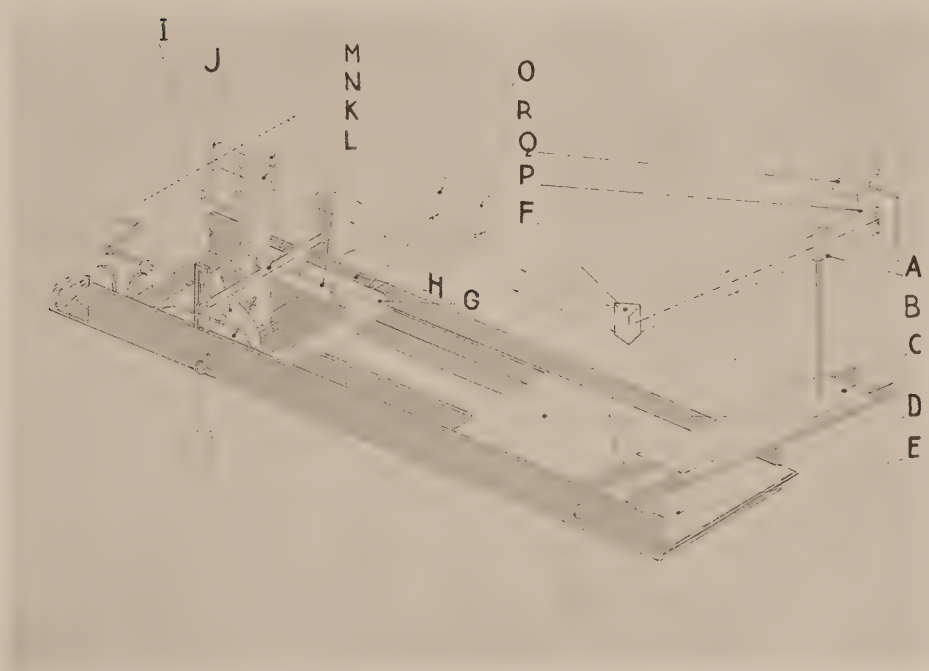


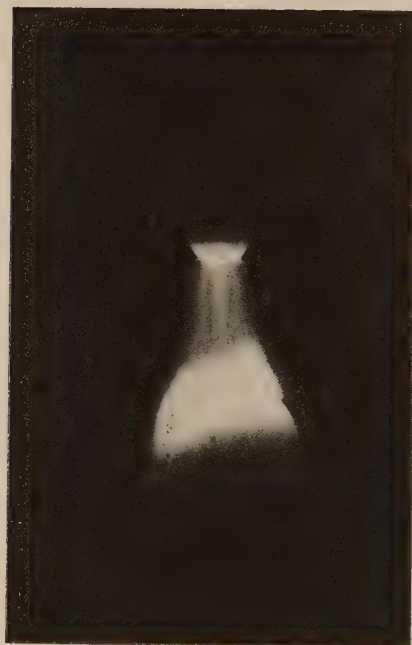
Fig. 25.



Arc normal 45 A.



Arc normal 115 A.

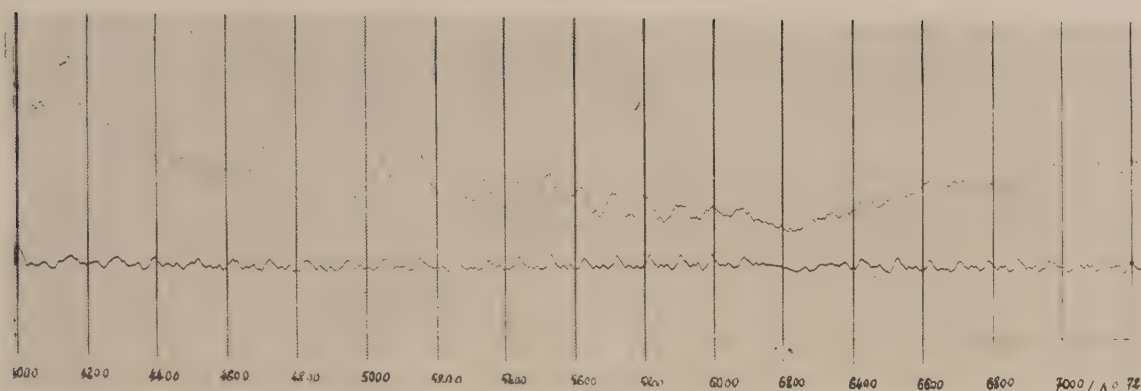
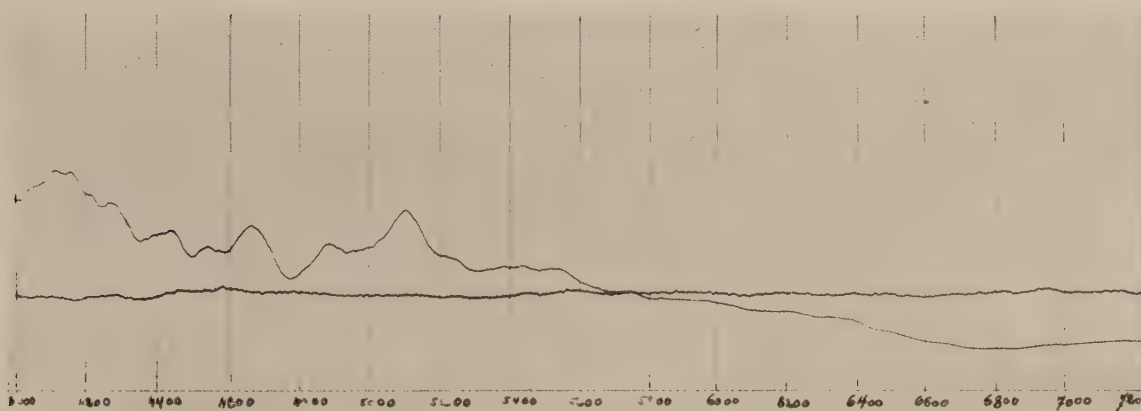
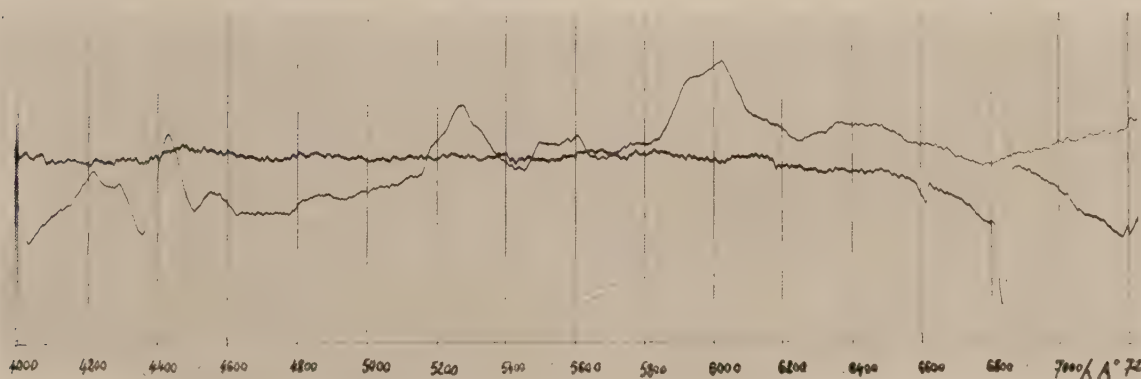


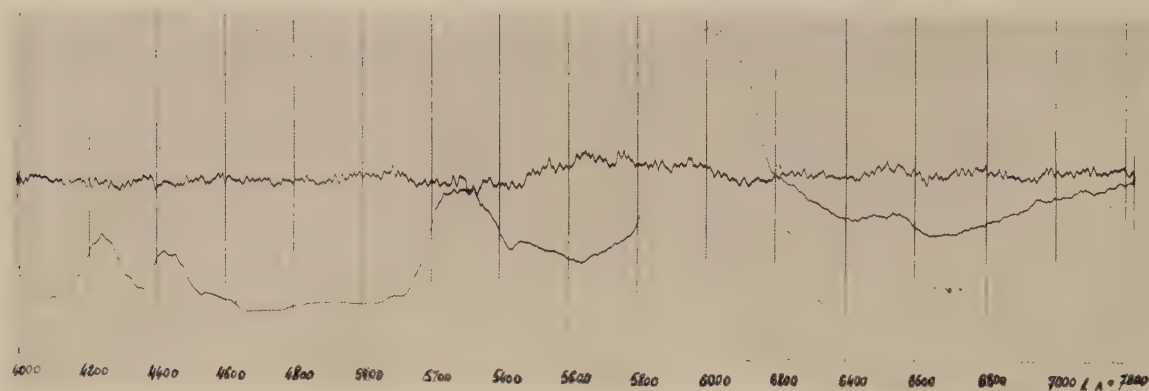
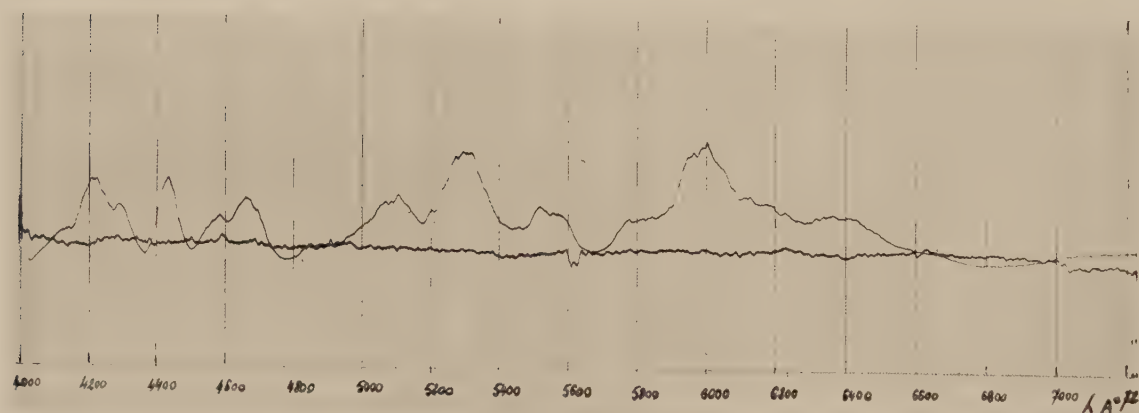
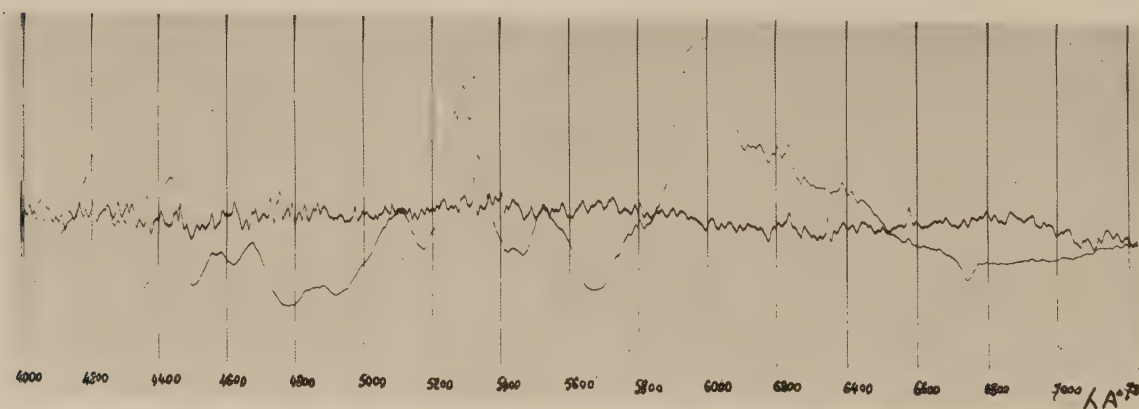
Arc soufflé 44 A.

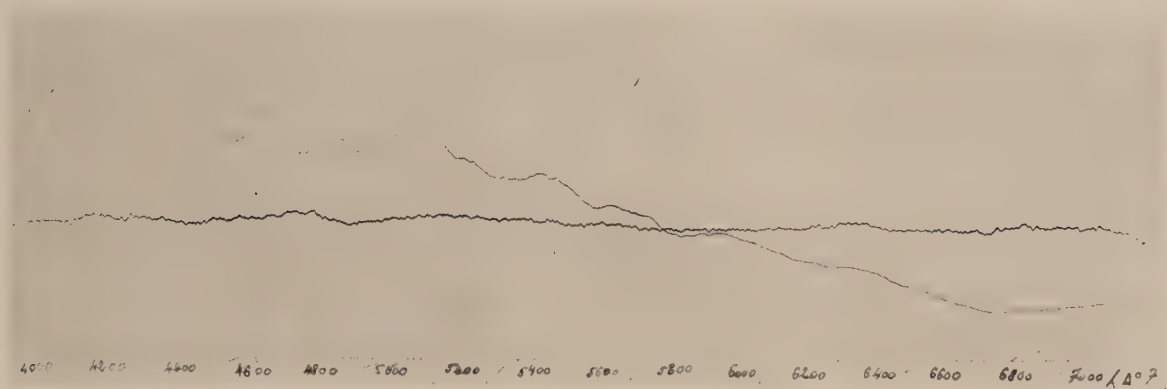
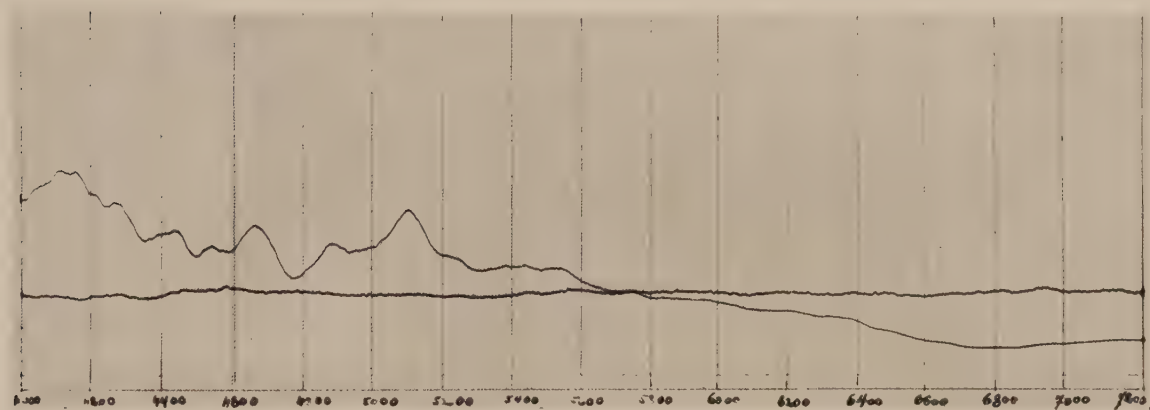
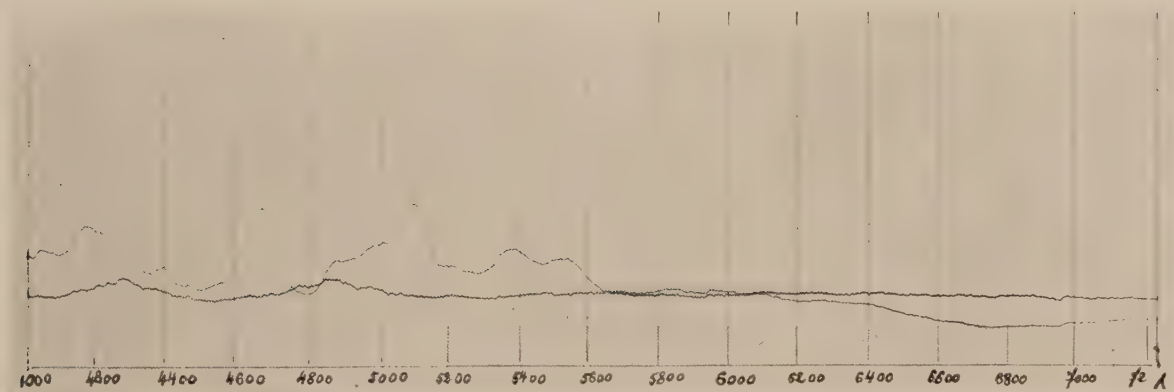


Arc normal 95 A.

Fig. 27. — Effet du soufflage dans le sens cathode-anode.

Fig. 46. — 1. + Orlux 550 Φ 16, 150 A.Fig. 46. — 2. + Orlux 544 Φ 7, 50 A.Fig. 47. — 1. Φ 8 mm, 50 % F_2Ca , 32 A cratère.

Fig. 47. — 2. Φ 8 mm, 50 % F_2Ca , flamme 32 A.Fig. 47. — 3. Φ 8 mm, 50 % F_2Ca , 60 A cratère.Fig. 47. — 4. Φ 8 mm, 50 % F_2Ca flamme 60 A.

Fig. 48. — 1. + Orlux 544 Φ 7 mm, 50 A (terres cériques).Fig. 48. — 2. + Orlux 2544 Φ 7 mm, 50 A (terres cériques + Fe Si).Fig. 48. — 3. + Orlux 3544 Φ 7 mm, 50 A (Fe Si).

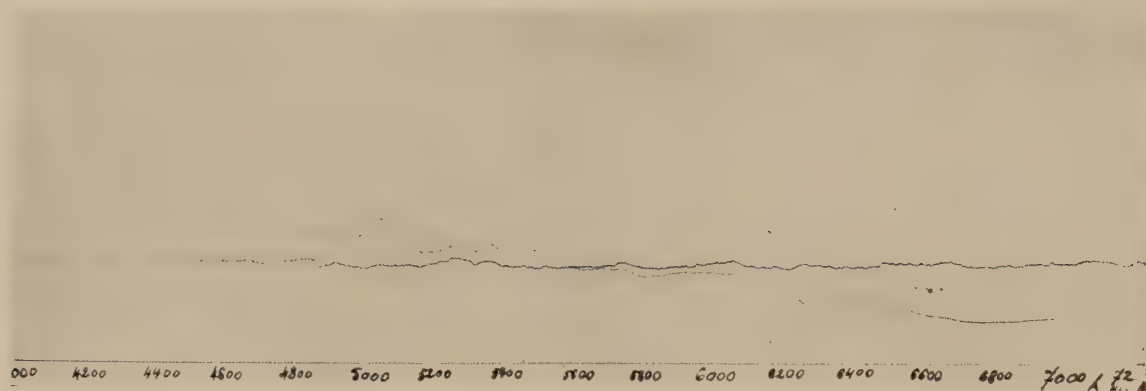


Fig. 48. — 4. + Orlux 644 Φ 7 mm, 50 A (thorium + titane).

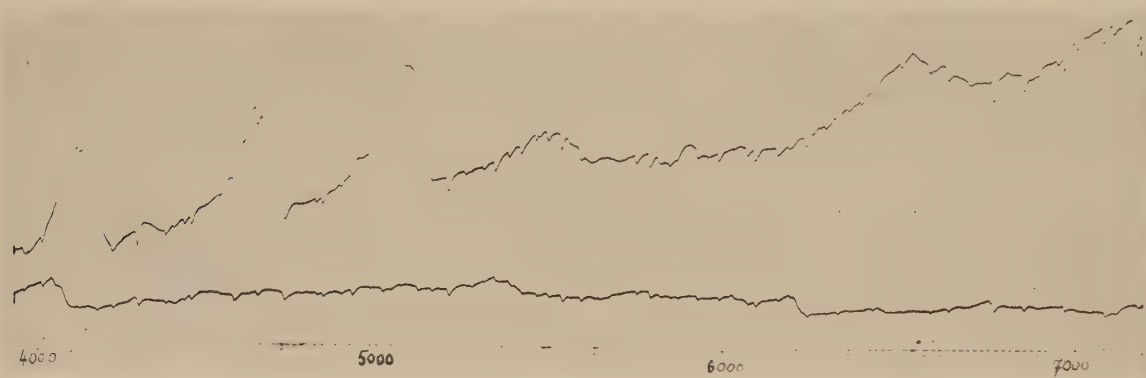


Fig. 48. — 5. Charbon homogène Φ 8 mm, 45 A.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS

Quai des Grands-Augustins, 55

134802

Dépôt légal, 1950, Imprimeur, n° 598.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS
134802 Quai des Grands-Augustins, 55.
